

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marko Josić

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Danko Ćorić

Student:

Marko Josić

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojem mentoru prof. dr. sc. Danku Ćoriću na pomoći, strpljenju i razumijevanju koje mi je iskazao tijekom izrade ovog rada.

Marko Josić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MARKO JOSIĆ**

Mat. br.: 0036459624

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **UTJECAJ BRZINE PRIRASTA NAPREZANJA NA MEHANIČKA SVOJSTVA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **EFFECT OF STRESS RATE ON THE MECHANICAL PROPERTIES**

Opis zadatka:

Ponašanje materijala pri statičkom vlačnom ispitivanju prvenstveno ovisi o strukturi materijala odnosno njegovom mikrostrukturnom stanju koje je određeno kemijskim sastavom i parametrima tehnološke obrade. Međutim, dodatan utjecaj imaju i neki vanjski čimbenici kao što je temperatura, geometrije epruvete, prisutnost agresivnog okoliša i brzina ispitivanja. Brzina prirasta naprežanja tijekom statičkog vlačnog ispitivanja uzrokuje manje ili veće očvršnuće materijala uslijed hladne deformacije što se u konačnici odražava i na postiziva mehanička svojstva.

U radu je potrebno:

1. opisati postupak statičkog vlačnog ispitivanja sukladno normi ISO 6892-1:2009;
2. ukratko opisati materijal korišten za eksperimentalna ispitivanja;
3. provesti prateća ispitivanja kidanjem epruveta na kidalici uz različite brzine prirasta naprežanja;
4. odrediti pripadajuća mehanička svojstva materijala;
5. analizirati dobivene rezultate i donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Danko Ćorić

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

v.d. predsjednika Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	ii
POPIS SLIKA	iv
POPIS TABLICA	vi
POPIS OZNAKA	vii
SAŽETAK	ix
1 UVOD	1
2 STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE	3
2.1 Svojstva utvrđena statičkim vlačnim ispitivanjem	3
2.1.1 Granica razvlačenja i vlačna čvrstoća	6
2.1.2 Istezljivost i kontrakcija	10
2.2 Brzine ispitivanja	14
3 ISPITNI UZORCI	18
3.1 Ispitni uzorci koji se koriste za limove i ploče debljine jednake ili veće od 3 mm, i za žice, šipke i presjeke s promjerom jednakim ili većim od 4 mm	19
3.1.1 Oblik ispitnog uzorka	19
3.1.2 Duljina ispitnog dijela epruvete	19
3.1.3 Početna mjerna duljina	20
3.1.4 Priprema ispitnih uzoraka	22
3.2 Ispitni uzorci koji se koriste za trake i limove debljine manje ili jednake 3 mm	23
3.2.1 Oblik ispitnog uzorka	23
3.2.2 Dimenzije ispitnog uzorka	23
3.2.3 Priprema ispitnih uzoraka	23
3.3 Ispitni uzorci koji se koriste za žice, šipke i presjeke promjera manjeg ili jednakog 4 mm	23
4 ISPITNI UREĐAJI (KIDALICE)	24
5 EKSPERIMENTALNI DIO	30
5.1 Rezultati ispitivanja	31

5.1.1	Ispitivanje pri brzini prirasta opterećenja $2 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	35
5.1.2	Ispitivanje pri brzini prirasta opterećenja $5 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	37
5.1.3	Ispitivanje pri brzini prirasta opterećenja $10 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	39
5.1.4	Ispitivanje pri brzini prirasta opterećenja $20 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	41
5.1.5	Ispitivanje pri brzini prirasta opterećenja $30 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	43
5.1.6	Ispitivanje pri brzini prirasta opterećenja $50 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	45
5.1.7	Ispitivanje pri brzini prirasta opterećenja $100 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	47
6	ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA.....	49
	ZAKLJUČAK	55
	LITERATURA.....	56

POPIS SLIKA

Slika 1	Dijagram sila - produljenje	3
Slika 2	Dijagram naprezanje - istezanje.....	5
Slika 3	Donja i gornja granica razvlačenja na krivuljama različitog oblika	7
Slika 4	Određivanje konvencionalne granice razvlačenja	8
Slika 5	Kvalitativni stvarni dijagram naprezanje – istezanje (1) za meki konstrukcijski čelik uz odgovarajući konvencionalni dijagram (2)	13
Slika 6	Epruveta kružnog poprečnog presjeka.....	20
Slika 7	Elektromehanička kidalica.....	26
Slika 8	Shema hidrauličke kidalice.....	27
Slika 9	Kidalica EU40mod: 1-mehanizam za stezanje epruvete, 2-hidraulični cilindar, 3-upravljačka konzola, 4-računalo i pisač, 5- traverza, 6-vodeći stupovi, 7-pogon	31
Slika 10	Epruvete nakon ispitivanja pri brzini prirasta opterećenja $2 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	32
Slika 11	Epruvete nakon ispitivanja pri brzini prirasta opterećenja $5 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	32
Slika 12	Epruvete nakon ispitivanja pri brzini prirasta opterećenja $10 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	32
Slika 13	Epruvete nakon ispitivanja pri brzini prirasta opterećenja $20 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	33
Slika 14	Epruvete nakon ispitivanja pri brzini prirasta opterećenja $30 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	33
Slika 15	Epruvete nakon ispitivanja pri brzini prirasta opterećenja $50 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	33
Slika 16	Epruvete nakon ispitivanja pri brzini prirasta opterećenja $100 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	34
Slika 17	Dijagram sila – produljenje za epruvetu A1	36
Slika 18	Dijagram sila – produljenje za epruvetu A2	36
Slika 19	Dijagram sila – produljenje za epruvetu A3	36
Slika 20	Dijagram sila – produljenje za epruvetu B1	38
Slika 21	Dijagram sila – produljenje za epruvetu B2	38
Slika 22	Dijagram sila – produljenje za epruvetu B3	38
Slika 23	Dijagram sila – produljenje za epruvetu C1	40
Slika 24	Dijagram sila – produljenje za epruvetu C2	40
Slika 25	Dijagram sila – produljenje za epruvetu C3	40
Slika 26	Dijagram sila – produljenje za epruvetu D1	42
Slika 27	Dijagram sila – produljenje za epruvetu D2	42
Slika 28	Dijagram sila – produljenje za epruvetu D3	42
Slika 29	Dijagram sila – produljenje za epruvetu E1	44
Slika 30	Dijagram sila – produljenje za epruvetu E2	44

Slika 31	Dijagram sila – produljenje za epruvetu E3	44
Slika 32	Dijagram sila – produljenje za epruvetu F1	46
Slika 33	Dijagram sila – produljenje za epruvetu F2	46
Slika 34	Dijagram sila – produljenje za epruvetu F3	46
Slika 35	Dijagram sila – produljenje za epruvetu G1	48
Slika 36	Dijagram sila – produljenje za epruvetu G2	48
Slika 37	Dijagram sila – produljenje za epruvetu G3	48
Slika 38	Prikaz promjene donje granice razvlačenja u ovisnosti o brzini prirasta opterećenja	49
Slika 39	Prikaz promjene gornje granice razvlačenja u ovisnosti o brzini prirasta opterećenja	50
Slika 40	Prikaz promjene vlačne čvrstoće u ovisnosti o brzini prirasta opterećenja	50
Slika 41	Prikaz promjene konačnog naprezanja u ovisnosti o brzini prirasta opterećenja	51
Slika 42	Vrijednosti naprezanja pri različitim brzinama prirasta opterećenja	51
Slika 43	Postotna razlika naprezanja pri različitim brzinama prirasta opterećenja	52
Slika 44	Razlike naprezanja pri različitim brzinama prirasta opterećenja	53
Slika 45	Prikaz promjene istežljivosti u ovisnosti o brzini prirasta opterećenja	53
Slika 46	Prikaz promjene kontrakcije u ovisnosti o brzini prirasta opterećenja	54

POPIS TABLICA

Tablica 1	Propisana brzina prirasta naprezanja.....	16
Tablica 2	Dimenzije epruveta kružnog poprečnog presjeka prema DIN 50125.....	21
Tablica 3	Vrijednosti tolerancija dimenzija poprečnog presjeka ispitnih uzoraka	22
Tablica 4	Značajke kodalice EU 40mod.....	30
Tablica 5	Rezultati deformabilnosti pri brzini ispitivanja $2 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	35
Tablica 6	Rezultati mehaničke otpornosti pri brzini ispitivanja $2 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	35
Tablica 7	Rezultati deformabilnosti pri brzini ispitivanja $5 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	37
Tablica 8	Rezultati mehaničke otpornosti pri brzini ispitivanja $5 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	37
Tablica 9	Rezultati deformabilnosti pri brzini ispitivanja $10 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	39
Tablica 10	Rezultati mehaničke otpornosti pri brzini ispitivanja $10 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	39
Tablica 11	Rezultati deformabilnosti pri brzini ispitivanja $20 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	41
Tablica 12	Rezultati mehaničke otpornosti pri brzini ispitivanja $20 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	41
Tablica 13	Rezultati deformabilnosti pri brzini ispitivanja $30 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	43
Tablica 14	Rezultati mehaničke otpornosti pri brzini ispitivanja $30 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	43
Tablica 15	Rezultati deformabilnosti pri brzini ispitivanja $50 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	45
Tablica 16	Rezultati mehaničke otpornosti pri brzini ispitivanja $50 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	45
Tablica 17	Rezultati deformabilnosti pri brzini ispitivanja $100 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	47
Tablica 18	Rezultati mehaničke otpornosti pri brzini ispitivanja $100 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	47

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	%	Istezljivost
b_0	mm	Početna širina plosnatog ispitnog uzorka
c	N/mm ²	Konstanta materijala
d_0	mm	Početni promjer ispitnog dijela epruvete kružnog poprečnog presjeka
d_1	mm	Promjer glave epruvete
E	N/mm ²	Modul elastičnosti
$\dot{\epsilon}_{Lc}$	s ⁻¹	Procijenjena brzina istezanja ispitnog dijela epruvete
F	N	sila
$\dot{\epsilon}_{Le}$	s ⁻¹	Brzina istezanja
F_{eH}	N	Sila pri gornjoj granici razvlačenja
F_{eL}	N	Sila pri donjoj granici razvlačenja
F_k	N	Konačna sila
F_m	N	Maksimalna sila
F_p	N	Sila pri kojoj dolazi do određenog trajnog istezanja
h	mm	Duljina glave epruvete
k		koeficijent proporcionalnosti
L_0	mm	Početna mjerna duljina epruvete
L_c	mm	Duljina ispitnog dijela epruvete
L_t	mm	Ukupna duljina epruvete
L_u	mm	Konačna mjerna duljina epruvete
ΔL_u	mm	Konačno produljenje epruvete
n		Koeficijent očvrnuća
r	mm	Prijelazni radijus
R_{eH}	N/mm ²	Gornja granica razvlačenja

R_{eL}	N/mm^2	Donja granica razvlačenja
R_k	N/mm^2	Konačno naprezanje
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
R_p	N/mm^2	Konvencionalna granica razvlačenja
S	mm^2	Površina poprečnog presjeka u određenom trenutku ispitivanja
S_0	mm^2	Početna površina poprečnog presjeka
S_u	mm^2	Konačna površina poprečnog presjeka
v_c	mm/s	Brzina pomaka traverze kidalice
v	$\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Brzina prirasta naprezanja
Z	%	Kontrakcija
σ	N/mm^2	Naprezanje
ε	mm/mm	Istezanje
ε_{el}	mm/mm	Elastično istezanje
ε_{pl}	mm/mm	Plastično istezanje
ε_{Apl}	mm/mm	Plastično istezanje u točki A
ε_s	mm/mm	Stvarno istezanje
ε_u	mm/mm	Konačno istezanje

SAŽETAK

Statičkim vlačnim ispitivanjem određuju se osnovna mehanička svojstva. Kako bi se rezultati mjerenja statičkog vlačnog ispitivanja, mjerenih u različitim mjernim laboratorijima mogli uspoređivati, postupak statičkog vlačnog ispitivanja određen je međunarodnim normama. Norma HRN EN ISO 6892-1 opisuje metodu statičkog vlačnog ispitivanja metala pri sobnoj temperaturi. Iako norma propisuje mnoge stavke statičkog vlačnog ispitivanja, nesigurnost rezultata se ne može potpuno ukloniti. Na rezultate mjerenja statičkog vlačnog ispitivanja utječu mnogi parametri: od brzine ispitivanja, temperature ispitivanja, dimenzija ispitnih uzoraka, ispitne opreme, pa sve do kvalitete obrade ispitnih uzoraka. U ovom radu nastojao se odrediti utjecaj brzine opterećivanja na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja. U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je statičko vlačno ispitivanje epruveta od mekog čelika uz različite brzine prirasta naprežanja u rasponu od $2 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ do $100 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Ispitivanje je provedeno na 21 ispitnom uzorku. Pri svakoj brzini ispitana su po tri ispitna uzorka. Brzine opterećivanja bile su takve da prirast naprežanja u epruveti iznosi redom: 2, 5, 10, 20, 30, 50, $100 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Ispitivanje je provedeno na univerzalnoj kidalici. Nakon ispitivanja provedena je analiza svih rezultata mjerenja. Na temelju rezultata ispitivanja donesen je zaključak.

1 UVOD

Mehaničko svojstvo predstavlja mjerljivu veličinu materijala, koja se može brojčano odrediti pomoću normiranih metoda ispitivanja. Mehanička svojstva materijala ističu se među ostalim fizikalnim i kemijskim svojstvima, jer se na temelju njih provodi dimenzioniranje konstrukcijskih dijelova strojeva i alata. Prilikom dimenzioniranja potrebno je sagledati intenzitet, način te trajanje svih mogućih mehaničkih opterećenja koja će se pojaviti tijekom eksploatacije. Stoga se strojni dijelovi odnosno dijelovi konstrukcija dimenzioniraju na osnovu onih mehaničkih svojstava koja karakteriziraju mehaničku otpornost materijala za određene eksploatacijske uvjete. Osnovni je cilj da se tijekom eksploatacije ne pojavi lom odnosno plastična ili trajna deformacija što bi funkcionalno onemogućilo rad strojnog dijela ili čitave konstrukcije. Na osnovi mehaničkih svojstava provodi se i izbor optimalnog materijala te se utvrđuju tehnološki parametri u proizvodnji. S pomoću mehaničkih svojstava može se objektivno ocijeniti kvaliteta materijala u prijamnoj kontroli poluproizvoda, te u završnoj kontroli proizvoda.

Mehanička svojstva kao i sva ostala posljedica su strukturnog stanja materijala. Strukturno stanje materijala dobiva se obradom materijala određenog (kemijskog) sastava određenim tehnološkim postupkom. Proračun mehaničkih svojstava koristeći (mikro)strukturne parametre moguć je samo za idealne tvari. U realnim materijalima utjecaj mikrostrukturnih nepravilnosti nije moguće obuhvatiti proračunom. Razlog toliko sniženoj stvarnoj vrijednosti u odnosu na teoretsku je prisutnost nepravilnosti u kristalnoj strukturi, prvenstveno dislokacija. Iz toga proizlazi da se mehanička svojstva realnih materijala mogu točno utvrditi samo eksperimentalnim ispitivanjima u laboratoriju. Često se pri ispitivanju mehaničkih svojstava oponašaju i neki "vanjski" uvjeti, kao što su na primjer povišena ili snižena temperatura, utjecaj korozivnih medija, itd. Iz navedenih razloga je oprema za ispitivanje mehaničkih svojstava iznimno složena i skupa. Na visoku cijenu ove opreme dodatno utječe relativno mali broj uređaja koji se za tu svrhu proizvode.

Ispitivanja mehaničkih svojstava detaljno su propisana normama, pri čemu se uobičajeno navode oblik i mjere ispitnog uzorka, uvjeti okoliša te način, brzina i trajanje djelovanja opterećenja.

Opća sistematizacija mehaničkih svojstava i uvjeta ispitivanja:

- a) Prema načinu djelovanja opterećenja – vlak, tlak, uvijanje, savijanje i smicanje
- b) Prema brzini djelovanja opterećenja – statičko i dinamičko (udarno/promjenljivo)
- c) Prema temperaturi ispitivanja – sobna ($23 \pm 5^{\circ}\text{C}$), povišena i snižena temperatura

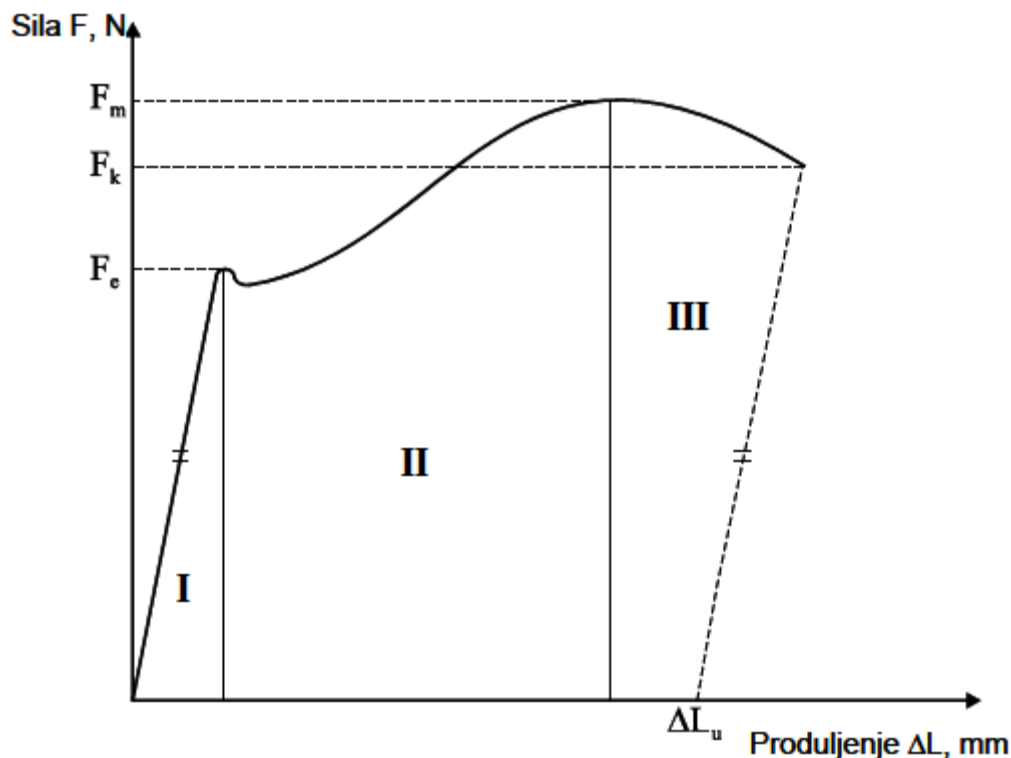
d) Prema trajanju djelovanja opterećenja – kratkotrajna i dugotrajna

U ovom radu opisano je statičko vlačno ispitivanje metalnih materijala na sobnoj temperaturi prema normi HRN EN ISO 6892-1. U drugom dijelu rada provedeno je ispitivanje na ispitnim uzorcima od mekog čelika. Kroz samo ispitivanje na više različitih brzina nastojalo se odrediti utjecaj brzine prirasta naprezanja na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja.

2 STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE

2.1 Svojstva utvrđena statičkim vlačnim ispitivanjem

Statičkim vlačnim pokusom ispituje se elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog vlačnog opterećenja. Ovakav oblik ispitivanja spada pod razorne metode ispitivanja materijala. Epruvete se na kidalicama opterećuju sve do pojave loma. Ovim ispitivanjem utvrđuju se mehanička svojstva koja karakteriziraju mehaničku otpornost materijala. Mehanička otpornost predstavlja otpor materijala prema deformaciji i lomu ili sposobnost materijala da podnosi naprezanja koja su prouzrokovana vanjskim opterećenjima. Podaci o mehaničkim svojstvima su vrlo važni jer omogućuju odabir materijala i dimenzioniranje dijelova. Epruvete se na kidalicama opterećuju sve do pojave loma, a iznos sile kojom je opterećena za vrijeme ispitivanja iskazan je na skali kidalice u N ili kN. Zbog opterećenja dolazi do produljenja epruvete, a na pisaču kidalice crta se dijagram sila (F) – produljenje (ΔL). Dijagram $F - \Delta L$ (dijagram kidanja) za neki niskouglični konstrukcijski čelik prikazan je na slici 1.



Slika 1 Dijagram sila - produljenje

U prvom dijelu $F - \Delta L$ dijagrama linearna je ovisnost sile i produljenja. To znači da istim prirastima sile odgovaraju i jednaka produljenja. Takva linearna ovisnost vrijedi sve do dostizanja F_e - sile razvlačenja ili tečenja. U drugom području dijagrama nakon dostizanja sile razvlačenja epruveta se nastavlja produljivati uz čak mali pad sile. U tom dijelu statičkog vlačnog pokusa više ne postoji linearna ovisnost između prirasta sile i produljenja. Za daljnje produljenje potreban je ponovni porast sile. Opterećenje se povećava sve do dostignuća maksimalne sile F_m . U trećem području dijagrama epruveta se nastavlja produljivati uz smanjenje potrebne sile zbog lokaliziranog intenzivnog smanjenja ploštine poprečnog presjeka. Konačno pri vrijednosti sile F_k - konačne sile dolazi do loma epruvete.

Sastavimo li puknutu epruvetu te izmjerimo razmak točaka koji je prije ispitivanja iznosio L_0 (početna mjerna duljina) dobit ćemo konačno mjernu duljinu L_u .

Produljenje nakon kidanja ΔL_u iznosi:

$$\Delta L_u = L_u - L_0, \text{ mm} \quad (1)$$

Ta vrijednost naznačena je također na apscisi dijagrama na slici 1, a dobiva se na taj način da se iz konačne točke dijagrama kidanja povuče paralela s linearnim djelom dijagrama te nađe presjecište s apscisom.

Iznosi sila pri statičkom vlačnom pokusu ne daju pravi uvid u mehaničku otpornost materijala ukoliko se ne uzme u obzir ploština poprečnog presjeka epruvete, odnosno ukoliko se umjesto sile F ne uvede naprezanje σ , koje se određuje izrazom:

$$\sigma = \frac{F}{S_0}; \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

gdje je sila F izražena u njutnima, a S_0 ploština početnog poprečnog presjeka epruvete u mm^2 . Osim jedinice naprezanja N/mm^2 , naprezanje se izražava i u paskalima ($\text{Pa} = \text{N/m}^2$).

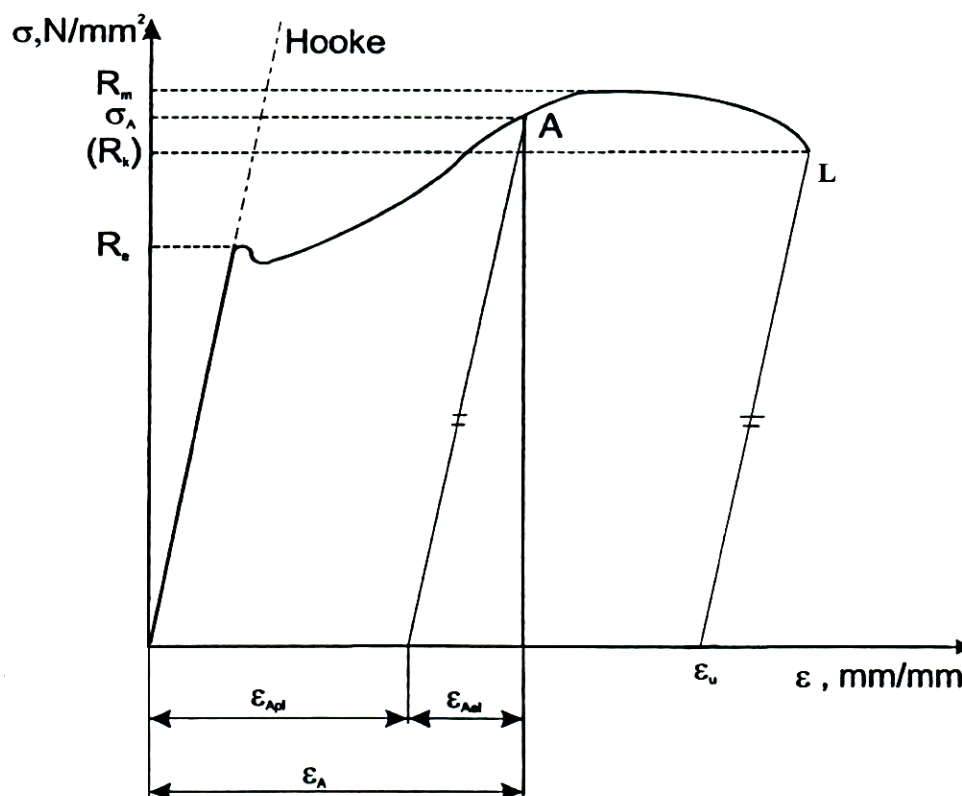
Ukoliko se produljenje ΔL podijeli s početnom mjernom duljinom L_0 dobiva se relativno produljenje ili istezanje ε prema izrazu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, \text{ mm/mm} \quad (3)$$

Istezanje se može izraziti i u postotcima:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100, \% \quad (4)$$

Na taj se način iz dijagrama $F - \Delta L$ dobiva dijagram naprezanje σ - istezanje ε koji je za konstrukcijski čelik u normaliziranom stanju prikazan na slici 2.



Slika 2 Dijagram naprezanje - istezanje

Dijagram $\sigma - \varepsilon$ je kvalitativno nalik dijagramu $F - \Delta L$ budući da se svi iznosi sile dijele s istom vrijednošću (S_0), a sve vrijednosti produljenja s vrijednošću L_0 . Dijagram počinje iz ishodišta Hookeovim pravcem za koji vrijedi Hookeov zakon:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \text{ N/mm}^2 \quad (5)$$

Što je modul elastičnosti (Youngov modul) E veći, za isto istezanje ε biti će potrebno veće

naprezanje σ , odnosno nagib Hookeovog pravca će biti strmiji. Modul elastičnosti je elastična konstanta materijala koja ovisi o čvrstoći veze između atoma u kristalnoj rešetki ili amorfnoj strukturi.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \text{ N/mm}^2 \quad (6)$$

Što je veza između atoma jača, veći je modul elastičnosti. Dakle, materijal veće krutosti ima veći modul elastičnosti, a elastičniji manji. Tako najveći modul elastičnosti ima dijamant $1.200.000 \text{ N/mm}^2$.

2.1.1 Granica razvlačenja i vlačna čvrstoća

Svako naprezanje u području gdje vrijedi Hookeov zakon izaziva samo elastičnu deformaciju što znači da u slučaju rasterećenja, nema trajne deformacije epruvete tj. njena duljina jednaka je L_0 . Hookeov pravac je, uz izvjesno pojednostavljenje, s gornje strane ograničen granicom razvlačenja R_e . Granica razvlačenja R_e je ono naprezanje kod kojeg se epruveta produljuje uz konstantno ili čak privremeno smanjenje naprezanja. Granica razvlačenja R_e utvrđuje se izrazom:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}, \text{ N/mm}^2, \quad (7)$$

gdje je:

- F_e – sila tečenja, N
- S_0 – ploština poprečnog presjeka, mm^2 .

Granicu razvlačenja karakteriziraju dvije vrijednosti: R_{eH} – gornja granica razvlačenja i R_{eL} – donja granica razvlačenja.

Gornja granica razvlačenja R_{eH} je maksimalna vrijednost naprezanja prije prvog smanjenja sile. Određuje se iz krivulje sila – produljenje ili indikatorom vršnog opterećenja i dobiva se dijeljenjem te sile s početnom površinom poprečnog presjeka

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (8)$$

gdje je:

- F_{eH} , N – sila pri gornjoj granici razvlačenja

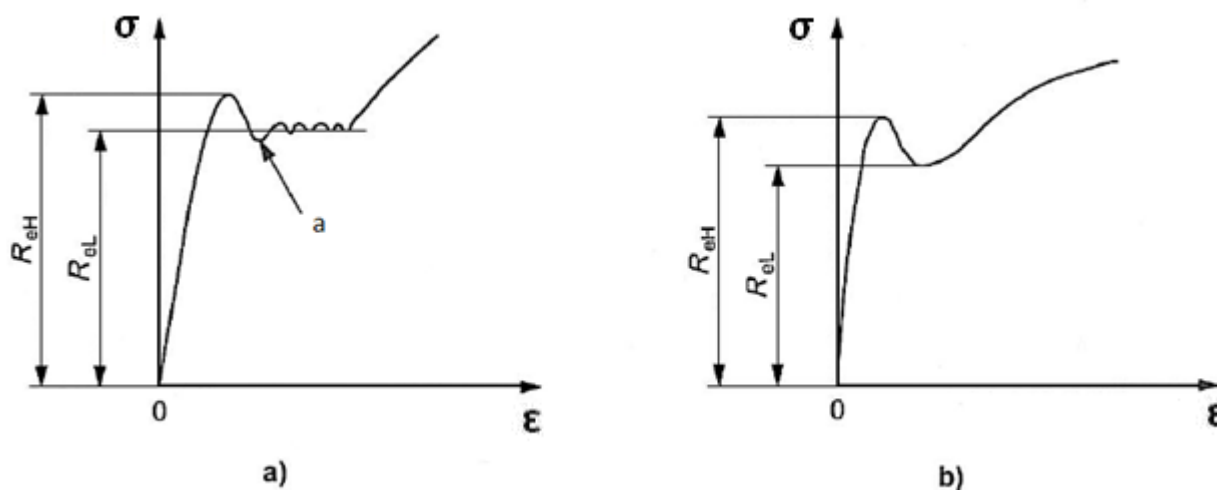
Donja granica razvlačenja, R_{eL} , je najmanje naprezanje tijekom tečenja materijala. Dobiva se dijeljenjem sile najmanjeg iznosa tijekom tečenja s početnom površinom poprečnog presjeka.

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (9)$$

gdje je:

- F_{eL} , N – najmanja sila u području tečenja.

Prema normi HRN EN ISO 6892–1, R_{eL} se može zapisati kao najmanja vrijednost naprezanja u prvih 0,25% istezanja nakon dostizanja R_{eH} , zanemarujući sve početne prijelazne efekte, slika 3.



Slika 3 Donja i gornja granica razvlačenja na krivuljama različitog oblika

- krivulja sa kolebanjem u području tečenja sa početnim prolaznim učinkom, a
- krivulja bez kolebanja u području tečenja

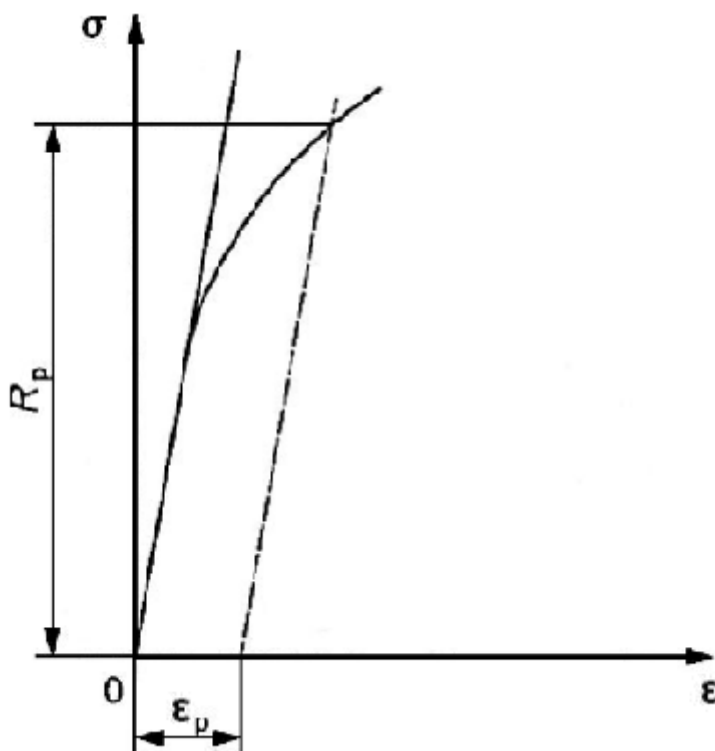
U dosta slučajeva materijali ne pokazuju sklonost tečenju, pa nemaju jasno izraženu granicu razvlačenja na krivulji naprezanje – istezanje. Tada se određuje konvencionalna granica razvlačenja R_p . Konvencionalna granica razvlačenja R_p je vrijednost naprezanja koja odgovara određenom

trajnom (plastičnom) istezanju ϵ_p , slika 4. Na primjer, kod $R_{p0,2}$ ostaje u materijalu nakon rasterećenja plastična deformacija od 0,2%. Konvencionalna granica razvlačenja R_p određuje se ili iz dijagrama naprezanje – istezanje ili iz krivulje sila – produljenje povlačenjem crte paralelne s linearnim dijelom krivulje koja na osi apscisa (produljenja) odsijeca iznos koji odgovara trajnom istezanju, npr. 0,2%. Ordinata sjecišta te paralele s krivuljom određuje silu koja pripada željenoj granici razvlačenja pri trajnom istezanju. Konvencionalna granica razvlačenja izračunava se dijeljenjem te sile s početnom površinom poprečnog presjeka epruvete:

$$R_p = \frac{F_p}{S_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (10)$$

gdje je:

- F_p , N – sila pri kojoj dolazi do određenog trajnog istezanja



Slika 4 Određivanje konvencionalne granice razvlačenja

Granica razvlačenja predstavlja ono naprezanje prema kojem se uz odabrani stupanj sigurnosti utvrđuje dopušteno naprezanje pri radu strojnih dijelova i dijelova uređaja.

Naprezanja veća od granice razvlačenja R_e izazivaju pored elastične i plastičnu (trajnu) deformaciju

epruvete. Ako se u točki A dijagrama na slici 2 epruveta rastereti, u njoj će ostati trajna plastična deformacija ε_{Apl} . To znači da će razmak mjernih točaka koji je prije bio označen sa L_0 biti uvećan za iznos ΔL_A pa je:

$$\varepsilon_{Apl} = \frac{\Delta L_A}{L_0}, \text{ mm/mm.} \quad (11)$$

Svaka se deformacija u materijalu nakon prijeđene vrijednosti R_e sastoji od elastične (povratne, privremene) deformacije ε_{el} koja rasterećenjem epruvete isčezava, te od plastične deformacije ε_{pl} koja ostaje trajno prisutna u materijalu. To je također prikazano na dijagramu rastezanja za točku A.

Iznos trajne deformacije u dijagramu $\sigma - \varepsilon$ se dobije tako da se iz željene točke na dijagramu povuče paralela s Hookeovim pravcem i nađe presjecište na osi apscisa.

Naprezanje kod maksimalne sile naziva se vlačna ili rastezna čvrstoća R_m i jednako je omjeru maksimalne sile F_m i ploštine poprečnog presjeka S_0 :

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \text{ N/mm}^2. \quad (12)$$

Veličinu R_m pogrešno je nazivati maksimalnim naprežanjem, nego je to naprežanje pri maksimalnoj sili. Naime ploština presjeka epruvete u području plastičnih deformacija, a napose nakon što se dostigne maksimalna sila počinje se naglo smanjivati pa stvarno naprežanje unatoč smanjenju sile raste! Vlačna čvrstoća R_m predstavlja osnovno mehaničko svojstvo na temelju kojeg se materijali vrednuju prema njihovoj mehaničkoj otpornosti.

Nakon dostignutog naprežanja R_m deformacija epruvete nije više jednolika po čitavom ispitnom dijelu već se lokalizira na jednom mjestu.

Naprežanje kod kojeg dolazi do loma epruvete zove se konačno naprežanje R_k koje je jednako:

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (13)$$

gdje je:

- F_k – konačna sila, N
- S_0 – ploština poprečnog presjeka, mm^2 .

2.1.2 Istezljivost i kontrakcija

Statičkim vlačnim pokusom utvrđuje se i konačno relativno produljenje (konačno istezanje) ε_u prema jednadžbi:

$$\varepsilon_u = \frac{\Delta L_u}{L_0}, \text{ mm/mm.} \quad (14)$$

Za određivanje istezljivosti A potrebno je sastaviti puknutu epruvetu. Oba dijela epruvete pažljivo spojiti tako da njihove osi leže u jednome pravcu. Posebno treba paziti da se prilikom mjerenja mjerne duljine nakon loma osigura ispravan kontakt prijelomnih površina prilikom mjerenja mjerne duljine nakon loma.

Istezljivost A definirana je sljedećim izrazom:

$$A = \varepsilon_u \cdot 100, \quad (15)$$

Rezultat je važeći samo ako udaljenost između mjesta loma (očitanja) i najbliže oznake mjerne duljine nije manja od $L_0/3$.

Ako se produljenje nakon loma mjeri pomoću ekstenzimetra tada nije potrebno označavati mjernu duljinu. Produljenje se u tom slučaju mjeri kao ukupno produljenje nakon loma, stoga je potrebno oduzeti elastično produljenje kako bi dobili konačnu mjernu duljinu nakon loma. Rezultat ovakvog određivanja je važeći samo kad stvaranje vrata i lom nastupe unutar mjerne duljine ekstenzimetra. Ako se sila povećava, procijenjena brzina prirasta istezanja može biti bitno ispod željene brzine istezanja zbog popustljivosti ispitnog uređaja.

Uobičajeno je da se pokraj simbola A ne navodi nikakva oznaka ukoliko je istezljivost utvrđena na kratkoj epruveti ($L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$) odnosno oznaka 11,3 ($A_{11,3}$) koja pokazuje da je istezljivost utvrđena na dugačkoj epruveti ($L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0}$). Budući da je na kratkoj epruveti ($L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$) nejednolična deformacija epruvete u blizini mjesta prijeloma epruvete u odnosu na jednolično produljenje epruvete dalje od mjesta prijeloma jače zastupljena nego kod dugačke epruvete ($L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0}$), veličina A uvijek je veća od veličine $A_{11,3}$ za isti materijal. Na osnovi iznosa istezljivosti A materijali se međusobno uspoređuju u pogledu deformabilnosti. No iznos istezljivosti daje samo informaciju o deformabilnosti materijala u uzdužnom (aksijalnom) smjeru epruvete.

Kako se epruveta prilikom statičkog vlačnog pokusa istovremeno produljuje i sužava (volumen je konstantan!) veličina koja karakterizira deformabilnost materijala u smjeru poprečnom na djelovanje opterećenja naziva se kontrakcijom Z . Ona predstavlja relativno suženje ploštine presjeka epruvete u odnosu na ploštinu poprečnog presjeka:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100, \%, \quad (16)$$

gdje je:

- S_0 – početna ploština poprečnog presjeka, mm^2
- S_u – ploština poprečnog presjeka epruvete na mjestu preloma, mm^2 .

Dijagram naprezanje – istezanje kakav smo do sada razmatrali naziva se inženjerski ili konvencionalni dijagram čiji tijek kvalitativno odgovara dijagramu sila F – produljenje ΔL . To međutim nije "stvarni" dijagram naprezanje – istezanje. Nije zbog toga što se iznosi naprezanja utvrđuju pomoću izraza (2) dijeljenjem sile sa početnom površinom presjeka S_0 što je ispravno samo u području elastičnih deformacija gdje se zbog promjenljivosti volumena unatoč produljenju epruveta ne sužuje. Stvarno naprezanje se određuje izrazom:

$$\sigma = \frac{F}{S}; \text{ N/mm}^2 \quad (17)$$

gdje je S , stvarna ploština presjeka epruvete u određenom trenutku ispitivanja, mm^2 .

U području plastičnih deformacija ($\sigma > R_e$) ploština poprečnog presjeka se smanjuje pa je naprezanje σ_s veće od inženjerskog σ ! Posebno je ta razlika izražena nakon dostizanja maksimalne sile F_m (odnosno vlačne čvrstoće R_m) jer se deformacija epruvete lokalizira i nastaje "vrat" epruvete. U inženjerskom dijagramu naprezanje – istezanje je na osi apscisa istezanje ε određeno izrazom (14), odnosno dijeljenjem produljenja ΔL s početnom mjernom duljinom L_0 . Ako se uzme u obzir da je relativno produljenje promjena duljine podijeljena s trenutačnom duljinom stvarno istezanje ε_s utvrđuje se izrazom koji predstavlja sumu produljenja ΔL u pojedinim trenucima

ispitivanja, podijeljenim s mjernom duljinom epruvete u trenutku neposredno prije toga:

$$\varepsilon_s = \frac{L_1 - L_0}{L_0} + \frac{L_2 - L_1}{L_1} + \dots + \frac{L_n - L_{n-1}}{L_{n-1}} \quad (18)$$

što se može pisati u obliku:

$$\varepsilon_s = \ln \frac{L}{L_0}, \text{ mm/mm} \quad (19)$$

Nakon što se epruveta počne plastično deformirati, iz konstantnosti volumena proizlazi:

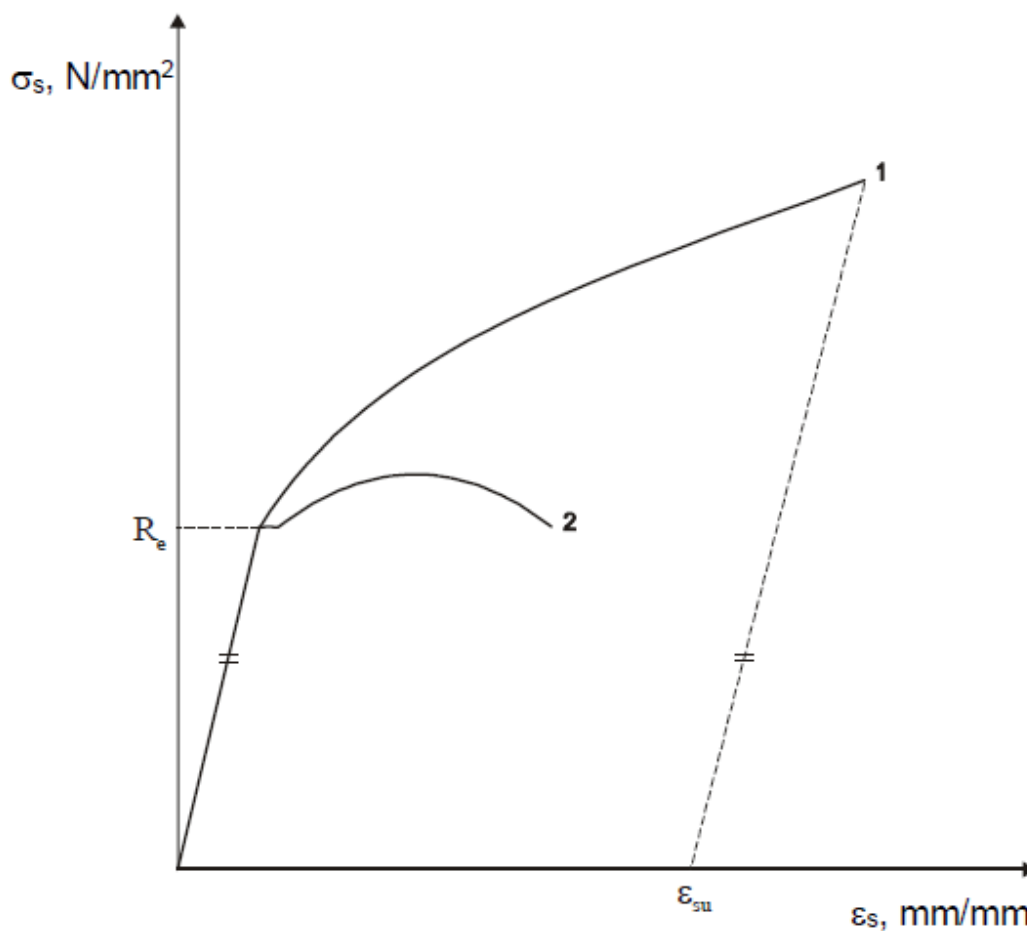
$$S_0 \cdot L_0 = S \cdot L \quad (20)$$

$$\frac{L}{L_0} = \frac{S_0}{S} = \frac{\frac{d_0^2 \cdot \pi}{4}}{\frac{d^2 \cdot \pi}{4}} = \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \text{ pa je} \quad (21)$$

$$\varepsilon_s = 2 \ln \frac{d_0}{d}, \text{ mm/mm} \quad (22)$$

Posebno je važno izraz za stvarno istezanje u ovom obliku primjenjivati nakon dostignute maksimalne sile F_m jer se od tada epruveta ne produljuje po cijeloj mjernoj duljini jednoliko već se deformacija koncentrira na jednom mjestu epruvete.

Kvalitativni stvarni dijagram naprezanje – istezanje za neki konstrukcijski čelik prikazan je na slici 5.



Slika 5 Kvalitativni stvarni dijagram naprezanje – istezanje (1) za meki konstrukcijski čelik uz odgovarajući konvencionalni dijagram (2)

U elastičnom području dijagrama ($\sigma_s < R_e$) stvarno naprezanje i istezanje povezuje Hookeov zakon:

$$\sigma_s = E \cdot \varepsilon_s, \text{ N/mm}^2 \quad (23)$$

U plastičnom području ($\sigma_s > R_e$) vrijedi:

$$\sigma_s = R_e + c \cdot \varepsilon_s^n, \text{ N/mm}^2 \quad (24)$$

gdje je:

- c – konstanta materijala, N/mm^2 , a
- n – koeficijent očvrnuća čiji se iznos za metalne materijale kreće od 0,25 do 0,5.

2.2 Brzine ispitivanja

U metodi A norme HRN EN ISO 6892-1 navode se dva načina upravljanja brzinom ispitivanja. Prvi način je upravljanje samom brzinom istezanja \dot{e}_{Le} , pomoću povratnih informacija o produljenju dobivenih od ekstenzimetra. Drugi način je upravljanje procijenjenom brzinom istezanja ispitnog dijela epruvete \dot{e}_{LC} , što se postiže regulacijom brzine pomaka na brzinu jednaku umnošku željene brzine istezanja i duljine ispitnog dijela epruvete.

Ako se materijal deformira homogeno pri konstantnoj sili, brzina prirasta istezanja \dot{e}_{Le} , i procijenjena brzina prirasta istezanja ispitnog dijela epruvete \dot{e}_{LC} su približno jednake. Različite su ako materijal pokazuje diskontinuirano ili nazubljeno deformiranje ili u slučaju stvaranja vrata. Ako se sila povećava, procijenjena brzina prirasta istezanja može biti bitno ispod željene brzine istezanja zbog popustljivosti ispitnog uređaja.

- a) U linearnom dijelu dijagrama i tijekom utvrđivanja R_{eH} ili R_p treba biti primjenjena propisana brzina prirasta istezanja \dot{e}_{Le} . U tom rasponu, da bi se eliminirao utjecaj popustljivosti ispitnog uređaja, neophodno je korištenje ekstenzimetra za postizanje točne regulacije brzine prirasta istezanja. (Za ispitne uređaje koji ne mogu regulirati brzinu prirasta istezanja primjenjuje se postupak upravljanja procijenjenom brzinom prirasta \dot{e}_{LC} .)
- b) Tijekom tečenja materijala, primjenjuje se procijenjena brzina istezanja \dot{e}_{LC} . U području tečenja nije moguće regulirati brzinu istezanja korištenjem ekstenzimetra zato što se lokalizirano tečenje može pojaviti izvan mjerne duljine ekstenzimetra. Potrebna procijenjena brzina istezanja može se u ovom području regulirati s dovoljnom točnošću koristeći konstantnu brzinu pomaka steznih čeljusti v_c ,

$$v_c = L_c \cdot \dot{e}_{LC} \quad (25)$$

gdje je:

- v_c – brzina pomaka traverze kidalice,
- L_c – duljina ispitnog dijela epruvete.

c) U području nakon R_p ili nakon tečenja možemo koristiti brzinu prirasta istezanja \dot{e}_{Le} ili procijenjenu brzinu istezanja \dot{e}_{Lc} . Preporučeno je korištenje \dot{e}_{Lc} da bi se izbjegli problemi s regulacijom koji mogu nastati ako se stvaranje vrata javi izvan mjerne duljine ekstenzimetra.

Brzina istezanja, \dot{e}_{Le} , mora biti što je više moguće ravnomjerna u linearnom dijelu dijagrama i tijekom određivanja R_{eH} ili R_p . Tijekom određivanja navedenih svojstava brzina prirasta istezanja mora biti u jednom od slijedećih propisanih raspona:

- Raspon 1: $\dot{e}_{Le} = 0,00007 \text{ s}^{-1}$, sa relativnim odstupanjem $\pm 20\%$
- Raspon 2: $\dot{e}_{Le} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$, sa relativnim odstupanjem $\pm 20\%$ (preporučeno osim ako nije naznačeno drugačije).

Ako ispitni uređaj ne može direktno regulirati brzinu istezanja, treba koristiti (primijeniti) procijenjenu brzinu istezanja, \dot{e}_{Lc} , što znači da treba držati konstantnu brzinu pomaka steznih čeljusti.

Nakon što se odredi gornja granica razvlačenja R_{eH} , procijenjena brzina istezanja, \dot{e}_{Lc} , ona mora biti u jednom od slijedećih raspona sve dok ne završi područje tečenja

- Raspon 2: $\dot{e}_{Lc} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$, sa relativnim odstupanjem $\pm 20\%$
- Raspon 3: $\dot{e}_{Lc} = 0,002 \text{ s}^{-1}$, sa relativnim odstupanjem $\pm 20\%$ (preporučeno ako se određuje R_{eL}).

Nakon što su određena potrebna svojstva oko granice razvlačenja, procijenjena brzina prirasta istezanja, \dot{e}_{Lc} , mora se promijeniti na jednu od slijedećih propisanih vrijednosti:

- Raspon 2: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,00025 \text{ s}^{-1}$, sa relativnim odstupanjem $\pm 20\%$
- Raspon 3: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,002 \text{ s}^{-1}$, sa relativnim odstupanjem $\pm 20\%$
- Raspon 4: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,0067 \text{ s}^{-1}$, sa relativnim odstupanjem $\pm 20\%$ (preporučeno osim ako nije naznačeno drugačije).

No ako je svrha ispitivanja odrediti samo vlačnu čvrstoću, tada procijenjena brzina prirasta istezanja može biti kroz cijelo ispitivanje unutar raspona 3 i 4.

Metoda B propisuje brzine ispitivanja prema vrsti materijala, odnosno brzina ispitivanja ovisi o svojstvima materijala koji se ispituje. Iznos brzine prirasta naprezanja ovisi o iznosu modula elastičnosti za pojedini materijal.

U tablici 1 navedene su propisane vrijednosti brzine prirasta naprezanja.

Tablica 1 Propisana brzina prirasta naprezanja

Modul elastičnosti materijala $E, \text{N/mm}^2$	Brzina prirasta naprezanja $\dot{R}, \text{N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	
	min.	max.
<150 000	2	20
$\geq 150 000$	6	60

Prilikom utvrđivanja donje granice razvlačenja brzina istezanja u području ispitne duljine epruvete mora za vrijeme tečenja biti između $0,00025 \text{ s}^{-1}$ i $0,0025 \text{ s}^{-1}$. Brzina istezanja u području ispitne duljine epruvete mora biti što je više moguće stalna. Ako se brzina istezanja ne može regulirati direktno, mora se namjestiti podešavanjem brzine prirasta naprezanja neposredno prije početka tečenja. Uređaj se ne smije podešavati sve dok ne završi tečenje. Brzina prirasta naprezanja ni u kojem slučaju ne smije prijeći granice propisane u tablici 1.

Ako se želi odrediti konvencionalna granica razvlačenja, brzina pomaka steznih čeljusti treba biti što je više moguće konstantna. Brzina prirasta naprezanja mora biti unutar granica propisanih u tablici 1. Brzina istezanja ne smije biti veća od $0,0025 \text{ s}^{-1}$.

Nakon što se odredi granica razvlačenja, brzina ispitivanja može se povećati, ali s tim da brzina istezanja ne bude veća od $0,008 \text{ s}^{-1}$. U slučaju kada je potrebno izmjeriti samo vlačnu čvrstoću, brzina ispitivanja može biti jednaka tijekom cijelog ispitivanja, ali s tim da brzina istezanja ne smije biti veća od $0,008 \text{ s}^{-1}$.

3 ISPITNI UZORCI

Svojstva materijala se moraju ispitati normiranim, odnosno propisanim metodama. Osim informacija o mjernom uređaju, postupku ispitivanja (redoslijed, način mjerenja i računanja), stanju okoline (temperatura, vlažnost) i načinu iskazivanja rezultata, jako je važno propisati i ispitni uzorak ili tzv. epruvetu (oblik, dimenzije, stanje).

Uzorak materijala koji se ispituje obrađuje se na određeni oblik i dimenzije propisane normom.

Ispitni uzorak najčešće dobivamo strojnom obradom, međutim, gotove proizvode jednolikog poprečnog presjeka (žice, šipke, profili, cijevi, lanci i sl.) nije potrebno obrađivati, već se ispitivanje vrši u stanju u kojem se proizvodi ugrađuju u konstrukciju. Ispitne uzorke dobivene lijevanjem također nije potrebno dodatno obrađivati. Strojno-obrađivane epruvete izrađuju se uz obilno hlađenje da se struktura materijala ne promijeni, jer struktura utječe na svojstva. Površina mora biti fino obrađena bez ogrebotina i tragova obrade. Prijelaz s ispitnog dijela na glavu epruvete mora biti izveden s propisanim zaobljenjem r . Dimenzije prijelaznog radijusa r su bitne i preporučuje se da budu definirane u specifikaciji materijala ako nisu navedene u odgovarajućem dodatku. U tablici 2 navedeni su minimalni prijelazni radijusi za epruvete kružnog poprečnog presjeka. Duljina ispitnog dijela epruvete L_c mora uvijek biti veća od mjerne duljine epruvete L_0 .

Ako je ispitni uzorak gotovi proizvod, slobodna duljina između steznih čeljusti mora biti dovoljno dugačka da oznake mjerne duljine budu na dovoljnoj udaljenosti od steznih čeljusti.

Epruvete dobivene lijevanjem također moraju imati prijelazni radijus s dimenzijama propisanim normom. Duljina ispitnog dijela epruvete L_c mora uvijek biti veća od mjerne duljine epruvete L_0 .

Iako se uzorci obrađuju na određene dimenzije, potrebno je prije ispitivanja, mjerenjem utvrditi točne dimenzije svakog uzorka. Mjere se početna mjerna duljina, prijelazni radijus i mjere poprečnog presjeka. Norma propisuje da je dimenzije za određivanje poprečnog presjeka S_0 potrebno izmjeriti na dovoljno mjesta u središnjem dijelu ispitnog dijela epruvete. Preporučena su barem tri poprečna presjeka. Površina poprečnog presjeka S_0 je srednja vrijednost dobivenih rezultata.

Krajevi početne mjerne duljine moraju se označiti finim mjernim oznakama, ali nikako

zarecima koji bi mogli izazvati zarezno djelovanje i prijevremeni lom. Početna mjerna duljina mora se označiti s točnošću $\pm 1 \%$.

3.1 Ispitni uzorci koji se koriste za limove i ploče debljine jednake ili veće od 3 mm, i za žice, šipke i presjeke s promjerom jednakim ili većim od 4 mm

3.1.1 Oblik ispitnog uzorka

Najčešće se upotrebljavaju ispitni uzorci dobiveni obradom odvajanjem čestica. Moraju imati prijelazni radijus između ispitnog dijela epruvete i glave epruvete. Glave epruvete mogu biti bilo kojeg oblika prilagođenog steznim čeljustima ispitnog uređaja.

Minimalni prijelazni radijus mora iznositi:

- a) $0,75 \cdot d_0$, gdje je d_0 promjer ispitnog dijela epruvete kružnog poprečnog presjeka
- b) 12 mm za ostale ispitne uzorke

Poprečni presjek ispitnog uzorka može biti kružni, kvadratni, pravokutni ili u posebnim slučajevima nekog drugog oblika.

Za ispitne uzorke s pravokutnim poprečnim presjekom, preporučeno je da omjer širine i debljine ne bude veći od 8:1.

Uglavnom, promjer ispitnog dijela epruvete kružnog poprečnog presjeka dobivene obradom odvajanjem čestica ne smije biti manji od 3 mm.

3.1.2 Duljina ispitnog dijela epruvete

Duljina ispitnog dijela epruvete, L_c , mora iznositi minimalno:

- a) $L_0 + (d_0/2)$ za epruvete s kružnim poprečnim presjekom
- b) $L_0 + 1,5 \sqrt{S_0}$ za ostale ispitne uzorke

U slučaju dovoljne količine raspoloživog materijala ova duljina najčešće iznosi: $L_0 + 2 d_0$ ili $L_0 + 2\sqrt{S_0}$.

Ako je ispitni uzorak gotovi proizvod, slobodna duljina između steznih čeljusti mora biti

dovoljno dugačka da oznake mjerne duljine budu minimalno $\sqrt{S_0}$ udaljene od steznih čeljusti.

3.1.3 Početna mjerna duljina

Budući da se ovim ispitivanjem utvrđuju i neka svojstva kojima se opisuje deformabilnost materijala, a na osnovu kojih se materijali također mogu međusobno uspoređivati, dimenzije epruvete u uzdužnom smjeru u određenom su razmjeru s dimenzijom epruvete u poprečnom stanju.

Prema normi HRN EN ISO 6892-1, odnos između mjerne duljine i površine poprečnog presjeka dan je izrazom:

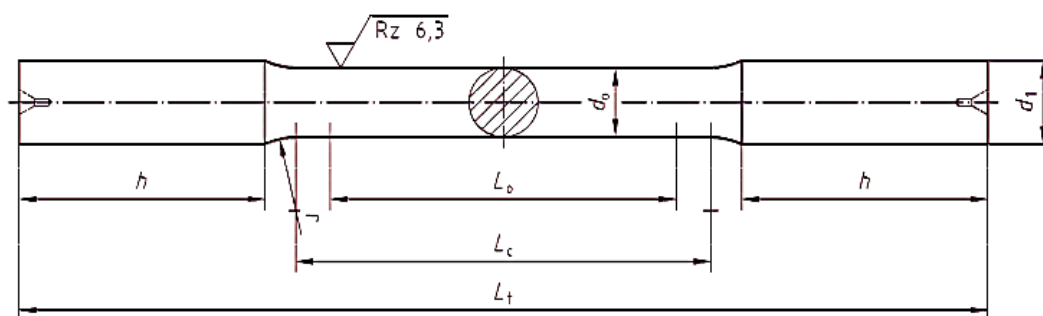
$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0} \quad (26)$$

gdje je:

- L_0 , mm – početna mjerna duljina,
- S_0 , mm² – početna površina poprečnog presjeka,
- k – koeficijent proporcionalnosti.

Koeficijent proporcionalnosti k za kratke proporcionalne epruvete iznosi 5,65, a za duge proporcionalne epruvete iznosi 11,3.

Najčešće se za ispitivanje vlačne čvrstoće koriste epruvete okruglog presjeka, no u slučaju kada se žele utvrditi mehanička svojstva nekog lima ili trake, koriste se uzorci četvrtastog poprečnog presjeka. Standardna epruveta kružnog presjeka sa glatkim cilindričnim glavama koje služe za stezanje epruvete u čeljusti kidalice prikazana je na slici 6.



Slika 6 Epruveta kružnog poprečnog presjeka

Oznake na slici 6 jesu slijedeće:

d_0 – početni promjer epruvete, mm

d_1 – promjer glave epruvete, mm

h – duljina glave epruvete, mm

L_0 – početna mjerna duljina epruvete, mm

L_c – duljina ispitnog dijela epruvete, mm

L_t – ukupna duljina epruvete, mm

S_0 – površina poprečnog presjeka epruvete, mm²

r – prijelazni radijus, mm

Primjeri dimenzija epruveta kružnog poprečnog presjeka s glatkim cilindričnim glavama dani su u tablici 2.

Tablica 2 Dimenzije epruveta kružnog poprečnog presjeka prema DIN 50125

d_0 mm	L_0 mm	d_1 min. mm	r min. mm	h min. mm	L_c min. mm	L_t min. mm
4	20	5	3	16	24	60
5	25	6	4	20	30	74
6	30	8	5	25	36	92
8	40	10	6	30	48	115
10	50	12	8	35	60	138
12	60	15	9	40	72	162
14	70	17	11	45	84	186
16	80	20	12	50	96	210
18	90	22	14	55	108	233
20	100	24	15	60	120	255
25	125	30	20	70	150	310

3.1.4 Priprema ispitnih uzoraka

Vrijednosti tolerancija dimenzija poprečnog presjeka ispitnih uzoraka dobivenih obradom odvajanjem čestica dane su u tablici 3.

Na primjer, vrijednost dana u tablici $\pm 0,03$ za nazivni promjer od 10 mm znači da niti jedan ispitni uzorak ne smije imati promjer izvan slijedećih vrijednosti:

$$10 \text{ mm} + 0,03 \text{ mm} = 10,03 \text{ mm}$$

$$10 \text{ mm} - 0,03 \text{ mm} = 9,97 \text{ mm}$$

Tablica 3 Vrijednosti tolerancija dimenzija poprečnog presjeka ispitnih uzoraka

	Nazivna mjera	Tolerancija	Tolerancija oblika
Veličina promjera kod epruveta kružnog poprečnog presjeka i dimenzije poprečnog presjeka pravokutnih epruveta	≥ 3 ≤ 6	$\pm 0,02$	0,03
	> 6 ≤ 10	$\pm 0,03$	0,04
	> 10 ≤ 18	$\pm 0,05$	0,04
	> 18 ≤ 30	$\pm 0,10$	0,05
Dimenzije poprečnog presjeka pravokutnih epruveta kojima su samo dvije nasuprotne stranice strojno obrađivane	≥ 3 ≤ 6	$\pm 0,02$	0,03
	> 6 ≤ 10	$\pm 0,03$	0,04
	> 10 ≤ 18	$\pm 0,05$	0,06
	> 18 ≤ 30	$\pm 0,10$	0,12
	> 30 ≤ 50	$\pm 0,15$	0,15

3.2 Ispitni uzorci koji se koriste za trake i limove debljine manje ili jednake 3 mm

3.2.1 Oblik ispitnog uzorka

Širina glave epruvete mora biti veća od širine ispitnog dijela epruvete. Prijelazni radijus između glave epruvete i ispitnog dijela epruvete mora iznositi minimalno 20 mm. Širina glave epruvete mora biti $\geq 1,2 b_0$, gdje je b_0 širina ispitnog dijela epruvete.

Prema dogovoru, ispitni uzorak može biti traka s paralelnim stranicama. Za proizvode sa širinom jednakom ili manjom od 20 mm, širina ispitnog uzorka može biti jednaka širini proizvoda.

3.2.2 Dimenzije ispitnog uzorka

Duljina ispitnog dijela epruvete ne smije biti manja od $L_0 + (b_0/2)$. Najčešće se uzima da je duljina ispitnog dijela jednaka $L_0 + 2 \cdot b_0$, osim ako nema dovoljno materijala.

Za ispitne uzorke s paralelnim stranicama i sa širinom manjom od 20 mm, početna mjerna duljina mora biti 50 mm, a razmak među steznim čeljustima $L_0 + 3 \cdot b_0$.

3.2.3 Priprema ispitnih uzoraka

Kod pripreme ispitnog uzorka ne smije se utjecati na njegova svojstva. Sva područja koja su očvrsnuta smicanjem ili tlačnim opterećenjem moraju biti odstranjena obradom odvajanjem čestica.

3.3 Ispitni uzorci koji se koriste za žice, šipke i presjeke promjera manjeg ili jednakog 4 mm

Ispitni uzorak je najčešće dio proizvoda koji nije potrebno dodatno obrađivati odvajanjem čestica. Početna mjerna duljina, L_0 , mora biti $200 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$, ili $100 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Razmak između steznih čeljusti mora iznositi minimalno $L_0 + 20 \text{ mm}$. U slučaju kada nije potrebno određivati istežljivost, može se uzeti razmak između steznih čeljusti od minimalno 50 mm.

4 ISPITNI UREĐAJI (KIDALICE)

Statički vlačni pokus opisan u prethodnom poglavlju provodi se na kidalicama. Kidalice služe za eksperimentalno ispitivanje mehaničkih svojstava na epruvetama ili gotovim strojnim dijelovima. Susrećemo ih u različitim laboratorijskim i industrijskim uvjetima.

S obzirom na sustav za opterećivanje koji koriste, postoje mehaničke i hidrauličke kidalice. Mehaničke kidalice su u stvari elektromehaničke, ali im je prijenos sile mehanički. Dakle elektromehanički pogon ostvaruje se pomoću električnog motora, reduktorskog prijenosa i jednog, dva ili četiri vretena za pomicanje traverze.

Danas postoji čitav niz različitih kidalica, a u praksi se najčešće koriste univerzalne kidalice na kojima se uzorak može opterećivati vlačno, tlačno i savojno. Kidalice su u posljednje vrijeme znatno usavršene, naročito u pogledu točnosti mjernog sustava i regulacije brzine opterećivanja, što je omogućeno primjenom različitih elektroničkih komponenti. Suvremene kidalice trebaju zadovoljiti sljedeće zahtjeve:

- da su što jednostavnije za rukovanje i što manje mase, a pri tom i dovoljno čvrste i krute kako ne bi došlo do neželjenih deformacija tijekom opterećivanja;
- da se opterećenje prenosi na ispitni uzorak na pravilan način i da se iznos sile može u svakom trenutku očitati sa zadovoljavajućom točnošću;
- da se opterećenje postiže mirno, bez udara, te da se po potrebi može održavati dulje vrijeme konstantnim;
- da uređaj za pričvršćivanje bude jednostavan, lak za rukovanje, a da pri tome onemogući klizanje krajeva ispitnog uzorka.

S obzirom na položaj osi ispitnog uzorka tijekom ispitivanja, kidalice mogu biti horizontalne i vertikalne. Kod horizontalnih kidalica epruveta je položena vodoravno, a kod vertikalnih kidalica okomito. Vertikalne kidalice su puno više zastupljene u svakodnevnom radu. Maksimalne sile koje se mogu postići su najčešće do 1000 kN, pa čak i više.

Kidalice se u principu sastoje od sljedećih dijelova:

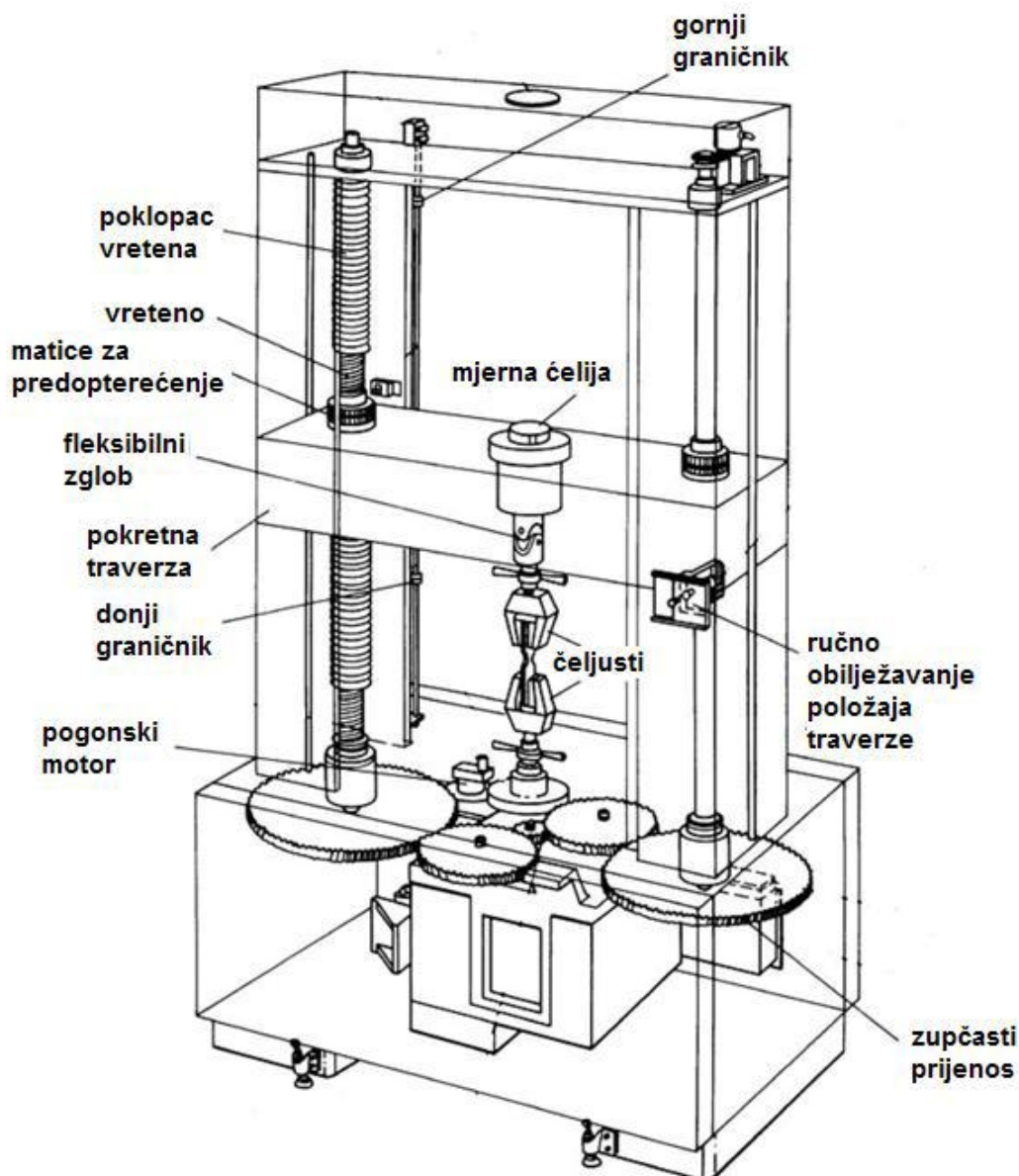
- okvir (postolje),
- mehanizam za opterećivanje,

- uređaj za mjerenje sile,
- uređaj za očitavanje.

Okvir kidalice sastoji se od vodilica, traverze i postolja u kojem je smješten pogonski mehanizam. Okvir mora podnositi opterećenja usklađena s pogonskim sustavom. Ovo rijetko predstavlja problem budući da je većina postolja napravljena tako da postiže veliku krutost. Okvir mora osigurati dovoljno radnog prostora i svjetla za neometano rukovanje ispitnim uzorkom. Kod nekih kidalica radni prostor omogućen je iznad i ispod pokretne traverze, ili je osiguran bočni pristup. Krutost okvira kidalice može se razmatrati kao aksijalna, poprečna i torzijska. Kod većine rutinskih vlačnih ispitivanja, aksijalna krutost je najvažniji parametar. Visoka krutost postolja minimizira pojavu deformacija, a samim time i elastičnu energiju koja se u njemu akumulira tijekom ispitivanja. Deformacije okvira prilikom opterećivanja nepovoljno utječu na točnost mjerenja.

Mehanizam za opterećivanje može biti elektromehanički i hidraulički. O vrsti uređaja za opterećivanje odlučuju konstrukcijski zahtjevi i potrebna maksimalna sila. Kidalice za opterećenja do 10 kN uglavnom imaju elektromehanički pogon. Između 10 kN i 100 kN mogu se koristiti oba pogona, i elektromehanički i hidraulički, ali se preferira elektromehanički. Za sile iznad 100 kN koristi se hidraulički pogon jer se na taj način relativno lakše postižu velike sile.

Maksimalna brzina kojom se ispitni uzorak opterećuje tijekom ispitivanja ograničena je vrstom kidalice. Maksimalna brzina traverze elektromehaničke kidalice određena je brzinom elektromotora u kombinaciji s reduktorom. Brzina traverze hidrauličkih kidalica ovisi o kapacitetu hidrauličke pumpe. U novije vrijeme ugrađuju se automatski regulatori pomoću kojih se brzina opterećivanja može unaprijed programirati. Konvencionalne elektromehaničke kidalice konstruirane su za brzine opterećivanja od 0,001 mm/min do 500 mm/min, što je pogodno za provođenje statičkih i polu-statičkih opterećivanja. Hidrauličke kidalice uglavnom imaju veći raspon brzina. Primjer elektromehaničke kidalice prikazan je na slici 7.



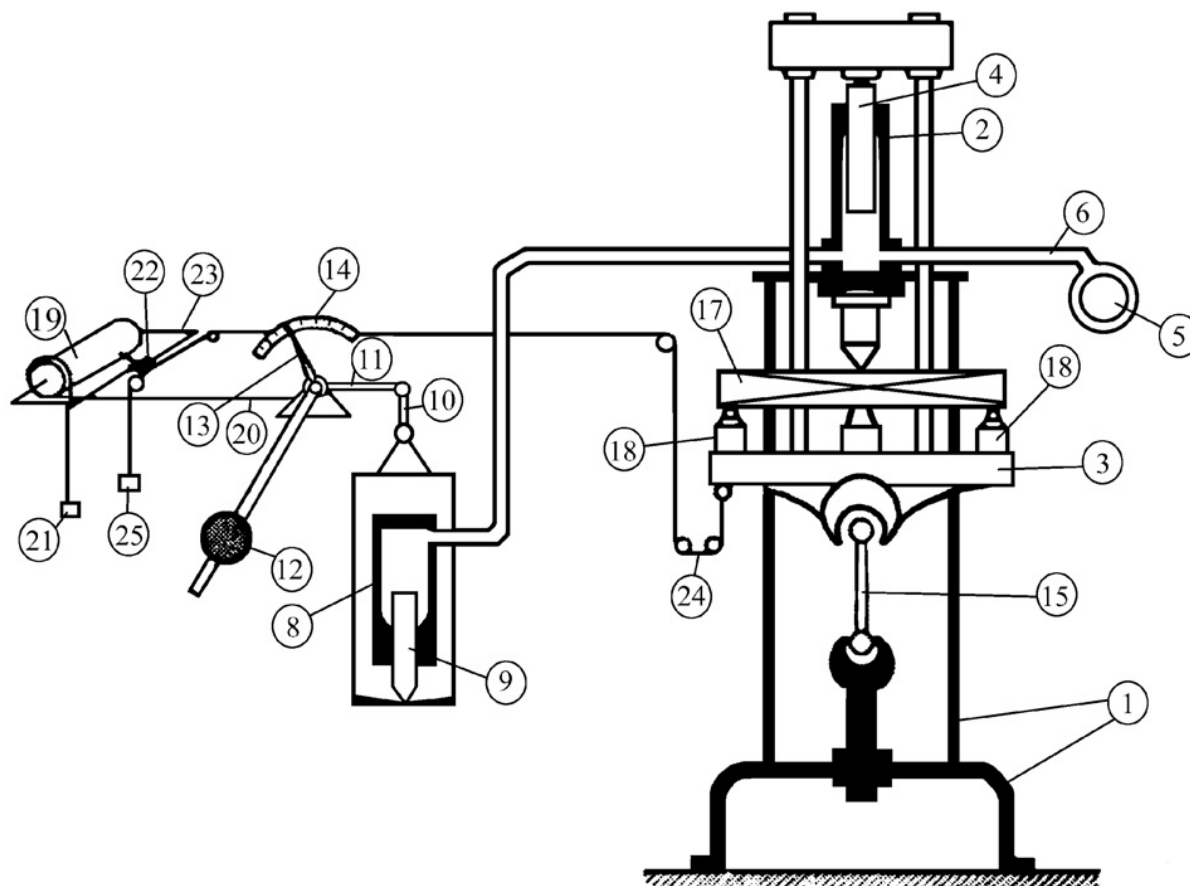
Slika 7 Elektromehanička kidalica

Radi se o kidalici s elektromehaničkim pogonom i mjernom ćelijom za mjerenje sile. Vretena su pokretana pomoću motora, mogu se okretati u oba smjera, a ujedno služe kao vodilice za pokretnu traverzu. Gibanjem traverze opterećuje se ispitni uzorak vlačno ili tlačno, ovisno o tome giba li se traverza prema gore ili dolje. Brzina traverze može se prilagođavati mijenjanjem brzine elektromotora ili mijenjanjem prijenosnog omjera.

Kidalice s vretenima mogu imati jedno, dva ili četiri vretena. Kod kidalica s više vretena, jedno vreteno mora imati lijevi navoj, a drugo desni kako bi se izbjeglo izvijanje ispitnog uzorka zbog rotacije vretena.

Kod kidalica s hidrauličkim pogonom, ulje pod pritiskom potiskuje klip u cilindru pri čemu dolazi do podizanja traverze ili podizanja cijelog stupa kidalice. Hidrauličke kidalice mogu koristiti jednoradne ili dvoradne klipove. Glavna prednost hidrauličkih kidalica je mogućnost podizanja visokih vrijednosti sila i precizna regulacija opterećenja.

Na slici 8 prikazana je shema jedne hidrauličke univerzalne kidalice.



Slika 8 Shema hidrauličke kidalice

1 postolje sa stupovima; 2 cilindar; 3 traverza; 4 klip; 5 hidraulička pumpa; 6 tlačni vod; 8 cilindar uređaja za mjerenje sile; 9 klip; 10 i 11 polužje uređaja za mjerenje sile; 12 uteg; 13 kazaljka; 14 skala; 15 epruveta za vlačno ispitivanje; 17 epruveta za ispitivanje na savijanje, tlak i odrez; 18 oslonci; 19 valjak s namotanim milimetarskim papirom; 20 uzica valjka; 21 uteg; 22 pisaljka; 23 vodilica; 24 uzica pisaljke; 25 uteg

Uređaj za namatanje opterećenja ima uljnu pumpu (5) koja tlači ulje i podiže klip (4) koji se nalazi u cilindru (2). Na taj način se nametne opterećenje potrebno podizanje traverze (3) i

opterećivanje epruvete. Traverza (3) i postolje (1) imaju čeljusti za stezanje epruvete (15), koja će se uslijed podizanja traverze istežati. Uređaj za mjerenje sile sastoji se od cilindra (8) u koji preko voda (6) iz cilindra (2) dolazi ulje i potiskuje klip (9). Klip će posredno djelovati na gibanje polužja (10) i (11) te će podizati uteg (12). On će preko njihala pokretati kazaljku (13), pa se na skali (14) mogu očitati vrijednosti ostvarene sile.

U ovoj konstrukciji kidalice je uređaj za mjerenje deformacije u sklopu pisača. On se sastoji iz valjka (19) na kojemu je namotan papir (obično milimetarski). Valjak se okreće pomoću uzice (20) koja je namotana na osovinu kazaljke (13). Da bi uzica bila uvijek zategnuta, na njenom kraju nalazi se uteg (21). Svaki pomak kazaljke izazvat će isti pomak valjka na kojem će pisaljka (22) zabilježiti promjenu vrijednosti sile po ordinati dijagrama. Horizontalnim gibanjem pisaljke po vodilici (23), induciranim uzicom (24), pisaljka će bilježiti promjenu deformacije po apscisi dijagrama. Uzica je vezana za traverzu (3), te putem kolotura vodi do pisaljke. Stalnu napetost u uzici vrši uteg (25).

Deformacija epruvete (15), tj. njezino produljenje, bilježi se na uređaju za ispis dijagrama $F - \Delta L$. Naime, gibanjem traverze (3) prema gore, ona za sobom povlači uzicu (24), a ona pisaljku (22), te će svaka deformacija epruvete za određenu vrijednost sile biti zabilježena na papiru omotanom oko valjka 19.

Sve moderne kidalice (elektromehaničke i hidrauličke) koriste regulacijski sustav. Brojne elektromehaničke kidalice imaju samo mogućnost upravljanja procijenjenom brzinom prirasta istežanja ispitnog dijela epruvete $\dot{\epsilon}_{Lc}$. Većina hidrauličkih kidalica, te neke elektromehaničke, imaju uređaje za kontrolu brzine prirasta istežanja $\dot{\epsilon}_{Le}$ i za kontrolu brzine prirasta naprezanja. Vrsta upravljanja može značajno utjecati na rezultate ispitivanja.

Za postizanje točne regulacije brzine prirasta istežanja $\dot{\epsilon}_{Le}$ neophodno je korištenje ekstenzimetra. Brzinom istežanja $\dot{\epsilon}_{Le}$ upravlja se pomoću povratnih informacija o produljenju dobivenih od ekstenzimetra. Kod upravljanja procijenjenom brzinom prirasta istežanja ispitnog dijela epruvete $\dot{\epsilon}_{Lc}$, koje se postiže regulacijom brzine pomaka v_c , dolazi do pogreške zbog deformiranja ispitnog uređaja koji nije idealno krut.

Razlike između kontrole procijenjene brzine prirasta istežanja ispitnog dijela epruvete $\dot{\epsilon}_{Lc}$ i kontrole brzine prirasta istežanja $\dot{\epsilon}_{Le}$ najveće su kod materijala s visokim modulom elastičnosti, kao što su čelici i kompoziti, čija je krutost značajna u odnosu na krutost same kidalice. Za materijale s niskim modulom elastičnosti, kao što su elastomeri i tekstil, kod kojih je krutost vrlo mala u usporedbi s krutošću kidalice, razlike između kontrole procijenjene brzine prirasta istežanja ispitnog

dijela epruvete $\dot{\epsilon}_{Lc}$ i kontrole brzine prirasta istezanja $\dot{\epsilon}_{Le}$ značajno su manje.

Ako se materijal deformira homogeno pri konstantnoj sili, brzina prirasta istezanja $\dot{\epsilon}_{Le}$, i procijenjena brzina prirasta istezanja ispitnog dijela epruvete $\dot{\epsilon}_{Lc}$ su približno jednake. Različite su ako materijal pokazuje diskontinuirano ili nazubljeno deformiranje ili u slučaju stvaranja vrata. Ako se sila povećava, procijenjena brzina prirasta istezanja može biti bitno ispod željene brzine istezanja zbog popustljivosti ispitnog uređaja.

Primjena regulacije brzine prirasta naprezanja ν omogućuje stabilnu kontrolu u elastičnom području. Nakon što ispitni uzorak uđe u fazu tečenja, kontrolna petlja postaje otvorena petlja. Kontrola se ponovno uspostavlja u elastično-plastičnom području sve do maksimalne sile.

Od velikog broja mehaničkih mjernih uređaja, najčešće se primjenjuje uređaj na principu nagibne vage koji se sastoji od klatna s jednim ili više utega poznatih masa. Ovaj mjerni sustav je vrlo jednostavan za rukovanje te u isto vrijeme i vrlo precizan. Kod starijih kidalica koristili su se uređaji za mjerenje sile pomoću opruga, ali se nisu pokazali dovoljno točnim. Danas se ponovno počinju primjenjivati zahvaljujući usavršenoj tehnologiji izrade opruga. Hidraulički mjerni uređaji su u pravilu jednostavniji, a sila se obično mjeri manometrom i razmjerna je tlaku ulja u cilindru. Najčešće primjenjivani hidraulički mjerni uređaj je manometar s klatnom. Za mjerenje sile danas se koriste i električna mjerila u obliku mjernih ćelija ili pretvornika sile (tlaka) koji vrijednost sile (tlaka) pretvaraju u naponski ili strujni signal.

S obzirom na vrstu uređaja za očitavanje sile može se raditi o kidalicama s analognim ili digitalnim pokazivačem. Analogne kidalice sadrže analognu kružnu skalu za svako mjerno područje, a digitalne kidalice numerički indikator.

5 EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je statičko vlačno ispitivanje epruveta od mekog čelika. Meki čelik spada u skupinu niskougličnih konstrukcijskih čelika i sadrži 0,16 do 0,29 % ugljika, a po svojoj mikrostrukturi je feritno-perlitni tako da nije ni previše krhak ni previše žilav. Ovaj čelik nema veliku vlačnu čvrstoću, ali je jeftin i lak za obradu. Niskouglični čelici općenito su najzastupljeniji čelici na tržištu zbog svoje relativno niske cijene, a mogu se iskoristiti za mnoge primjene, uglavnom u konstrukcijske svrhe.

Epruvete od mekog čelika su ispitane pri različitim brzinama prirasta naprezanja u rasponu od $2 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ do $100 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Brzine opterećivanja jesu takve da prirast naprezanja u epruveti iznosi redom: 2, 5, 10, 20, 30, 50, $100 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Ispitivanje je provedeno na ukupno 21 ispitnom uzorku, tako da su pri svakoj brzini ispitane po tri epruvete. Uzorci su kružnog poprečnog presjeka, početne mjerne duljine $L_0 = 120 \text{ mm}$, i početnog promjera poprečnog presjeka $d_0 = 12 \text{ mm}$. Površina početnog presjeka određena je preko izraza:

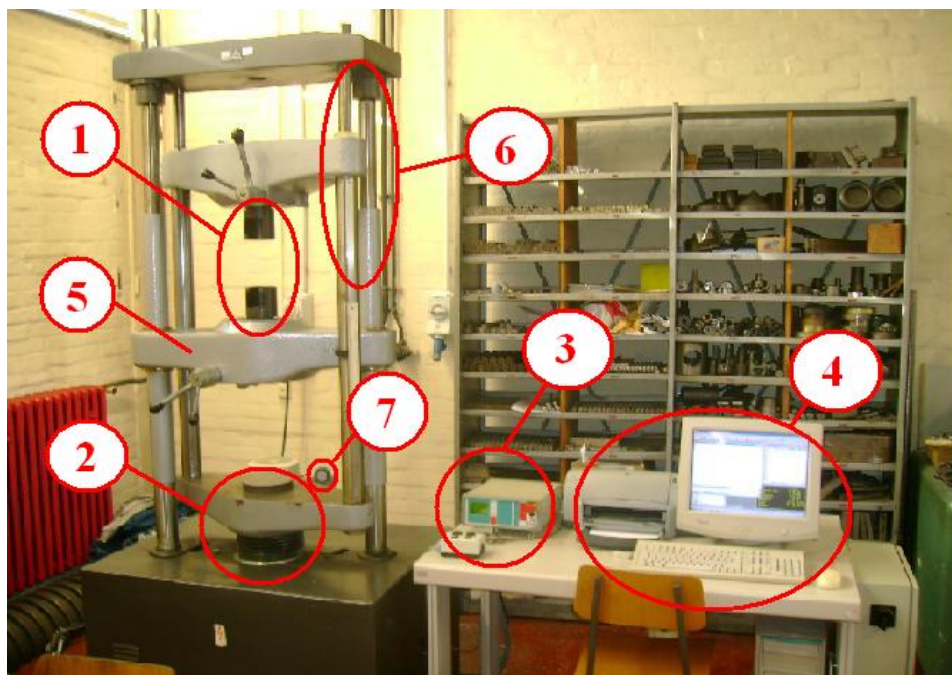
$$S_0 = \frac{d_0^2 \cdot \pi}{4}, \text{ mm}^2$$

i iznosi $113,1 \text{ mm}^2$.

Ispitivanja su provedena na hidrauličnoj kidalici EU 40mod (sl. 9) čije su karakteristike navedene u tablici 4.

Tablica 4 Značajke kidalice EU 40mod

<i>Proizvođač</i>	<i>WPM, Njemačka</i>
<i>Tip</i>	<i>Hidraulična</i>
<i>Vrsta</i>	<i>EU 40mod</i>
<i>Mjerno područje</i>	<i>0 – 400 kN</i>
<i>Smjer opterećenja</i>	<i>Vlak, tlak</i>
<i>Nazivna sila</i>	<i>400 kN</i>
<i>Mjerni sustav</i>	<i>Pretvornik tlaka; digitalni pokazivač</i>



Slika 9 Kidalica EU40mod: 1-mehanizam za stezanje epruvete, 2-hidraulični cilindar, 3-upravljačka konzola, 4-računalo i pisač, 5- traverza, 6-vodeći stupovi, 7-pogon

5.1 Rezultati ispitivanja

Tijekom razvlačenja epruveta na kidalici je bilježen dijagram kidanja ($F - \Delta L$) iz kojeg su očitane vrijednosti karakterističnih sila pri donjoj i gornjoj granici razvlačenja (F_{eL} , F_{eH}), maksimalna sila (F_m) i konačna sila (F_k). Na osnovi vrijednosti ovih sila i ploštine početnog poprečnog presjeka ispitnog uzorka izračunata su pripadajuća naprezanja: gornja granica razvlačenja, R_{eH} , donja granica razvlačenja, R_{eL} , vlačna čvrstoća, R_m i konačno naprezanje, R_k , sukladno jednadžbama (8), (9), (12) i (13).

Nakon loma epruvete potrebno je spojiti njena dva dijela kako bi se izmjerio razmak između krajnjih mjernih točaka i time odredila konačna mjerna duljina L_u i izračunalo konačno produljenje epruvete (ΔL_u). Vrijednosti produljenja i konačnog istezanja (ϵ_u) su određene iz izraza (1) i (14). Također je potrebno izmjeriti i konačni promjer epruvete d_u koji predstavlja najuži promjer epruvete na mjestu loma.

Istezanje nakon loma za kratku i dugu epruvetu, $A/A_{I1,3}$, i kontrakcija, Z , određeni su prema pripadajućim jednadžbama (15) i (16).

Slike 10 do 16 prikazuju epruvete nakon loma i položaj lomne površine.



Slika 10 Epruvete nakon ispitivanja pri brzini prirasta opterećenja $2 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$



Slika 11 Epruvete nakon ispitivanja pri brzini prirasta opterećenja $5 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$



Slika 12 Epruvete nakon ispitivanja pri brzini prirasta opterećenja $10 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$



Slika 13 Epruvete nakon ispitivanja pri brzini prirasta opterećenja $20 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$



Slika 14 Epruvete nakon ispitivanja pri brzini prirasta opterećenja $30 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$



Slika 15 Epruvete nakon ispitivanja pri brzini prirasta opterećenja $50 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$



Slika 16 Epruvete nakon ispitivanja pri brzini prirasta opterećenja $100 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

5.1.1 Ispitivanje pri brzini prirasta opterećenja $2 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

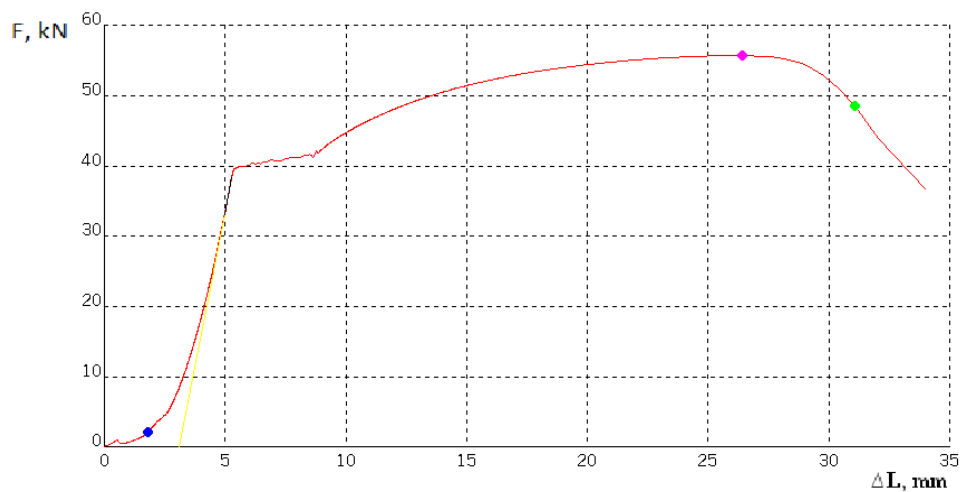
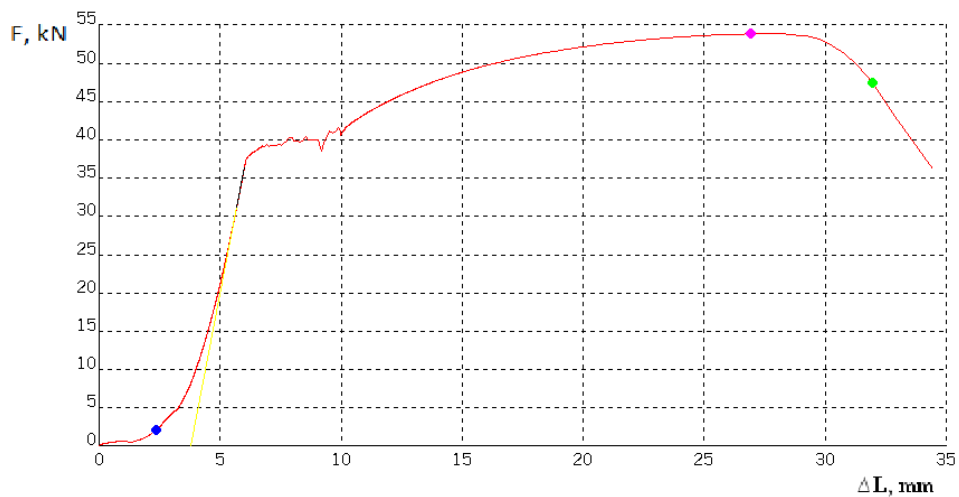
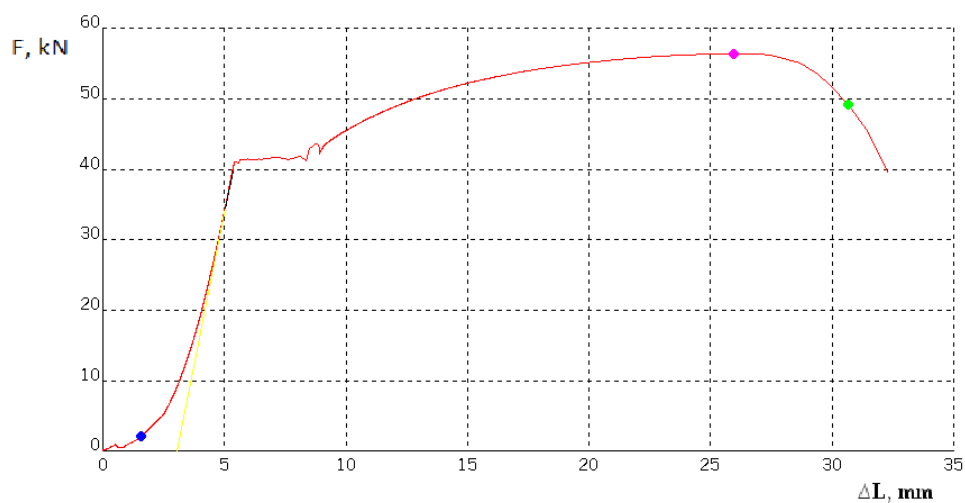
Pri ovoj brzini ispitane su tri epruvete oznaka A1, A2 i A3 čiji su dijagrami kidanja prikazani na slikama 17, 18 i 19. Rezultati ispitivanja sažeti su u tablicama 5 i 6.

Tablica 5 Rezultati deformabilnosti pri brzini ispitivanja $2 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Ispitni uzorak	d_0 (mm)	d_u (mm)	S_u (mm)	L_u (mm)	ΔL_u (mm)	ε_u (mm/mm)	A (%)	$A_{11,3}$ (%)	Z (%)
A1	12,0	6,6	34,19	76,8/144,4	16,8/24,4	0,280/0,203	28,0	20,3	69,8
A2	12,0	6,7	35,24	76,1/145,0	16,1/25,0	0,268/0,208	26,8	20,8	68,8
A3	12,0	6,8	36,32	76,2/144,6	16,2/24,6	0,270/0,205	27,0	20,5	67,8
Srednja vrijednost	12,0	6,7	35,24	76,4/144,6	16,4/24,7	0,273/0,206	27,3	20,6	68,8

Tablica 6 Rezultati mehaničke otpornosti pri brzini ispitivanja $2 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Ispitni uzorak	F_{eL} (kN)	F_{eH} (kN)	F_m (kN)	F_k (kN)	R_{eL} (N/mm ²)	R_{eH} (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	R_k (N/mm ²)
A1	40,75	40,81	55,68	48,54	360	361	492	429
A2	38,43	40,26	53,78	47,38	340	356	476	419
A3	41,02	41,74	56,40	49,18	363	369	500	435
Srednja vrijednost	40,07	40,94	55,29	48,37	354	362	489	428

**Slika 17** Dijagram sila – produljenje za epruvetu A1**Slika 18** Dijagram sila – produljenje za epruvetu A2**Slika 19** Dijagram sila – produljenje za epruvetu A3

5.1.2 Ispitivanje pri brzini prirasta opterećenja $5 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

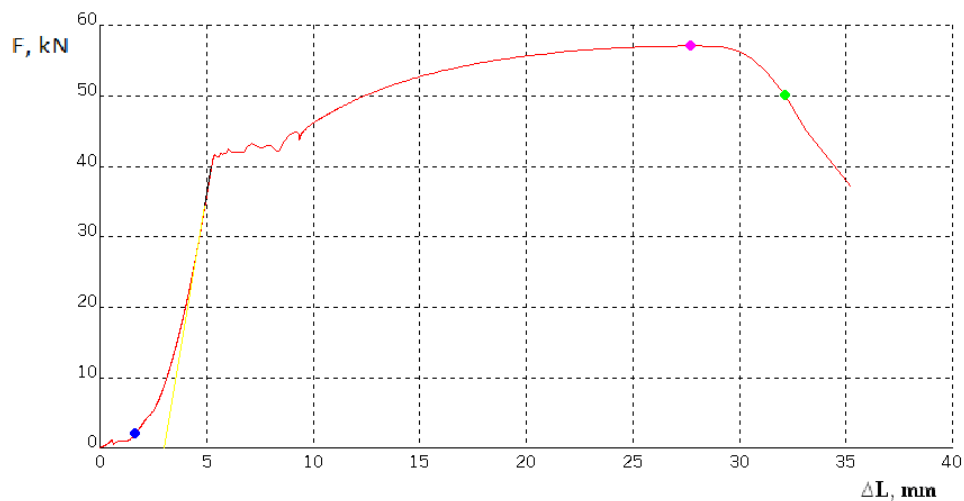
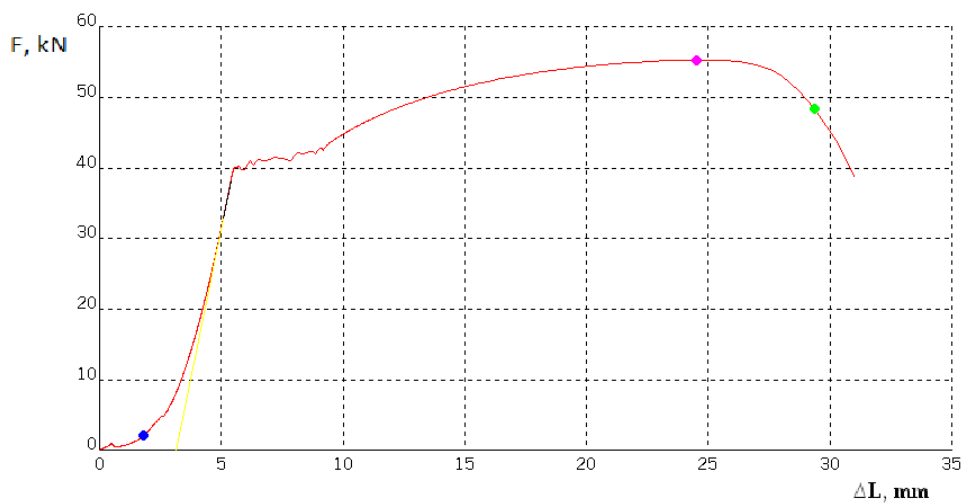
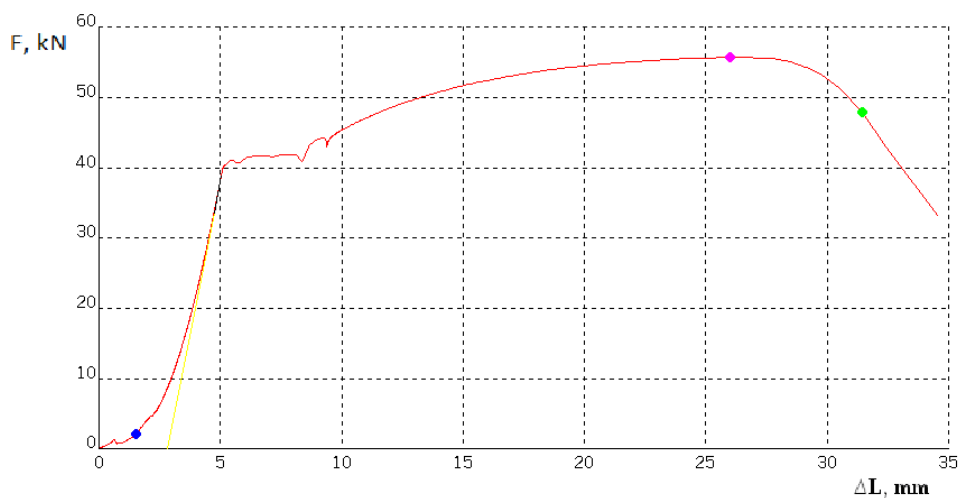
Pri ovoj brzini ispitane su tri epruvete oznaka B1, B2 i B3 čiji su dijagrami kidanja prikazani na slikama 20, 21 i 22. Rezultati ispitivanja sažeti su u tablicama 7 i 8.

Tablica 7 Rezultati deformabilnosti pri brzini ispitivanja $5 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Ispitni uzorak	d_0 (mm)	d_u (mm)	S_u (mm)	L_u (mm)	ΔL_u (mm)	ε_u (mm/mm)	A (%)	$A_{11,3}$ (%)	Z (%)
B1	12,0	6,9	37,27	76,5/146,3	16,5/24,6	0,275/0,219	27,5	21,9	67,0
B2	12,0	6,8	36,30	78,1/145,7	18,1/25,7	0,302/0,214	30,2	21,4	67,9
B3	12,0	6,9	37,39	75,3/143,6	15,3/23,6	0,255/0,197	25,5	19,7	66,7
Srednja vrijednost	12,0	6,9	37,05	76,6/145,2	16,6/24,6	0,277/0,210	27,7	21,0	67,2

Tablica 8 Rezultati mehaničke otpornosti pri brzini ispitivanja $5 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Ispitni uzorak	F_{eL} (kN)	F_{eH} (kN)	F_m (kN)	F_k (kN)	R_{eL} (N/mm ²)	R_{eH} (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	R_k (N/mm ²)
B1	41,99	42,42	57,07	50,09	371	375	505	443
B2	40,62	40,96	55,65	47,89	359	362	492	423
B3	40,13	41,78	55,25	48,41	355	369	492	428
Srednja vrijednost	40,91	41,72	55,99	48,80	362	369	496	431

**Slika 20** Dijagram sila – produljenje za epruvetu B1**Slika 21** Dijagram sila – produljenje za epruvetu B2**Slika 22** Dijagram sila – produljenje za epruvetu B3

5.1.3 Ispitivanje pri brzini prirasta opterećenja $10 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

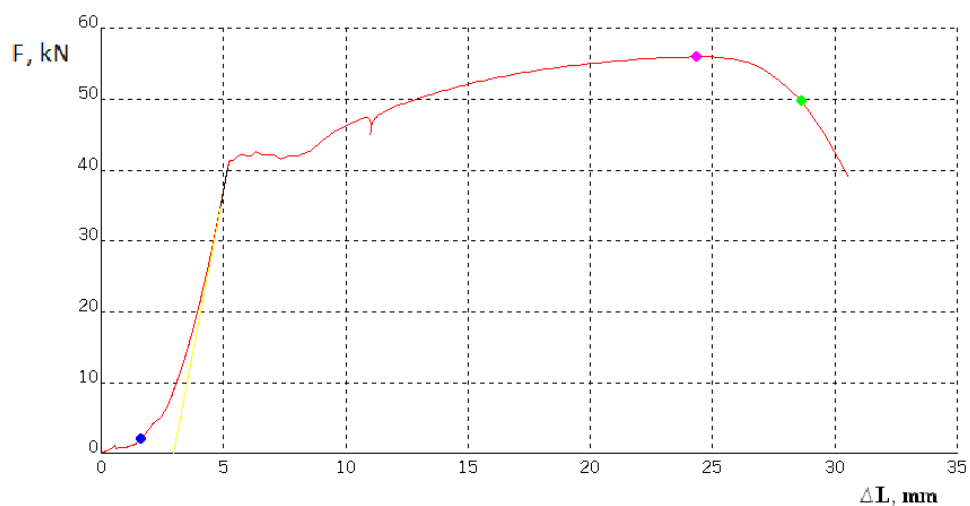
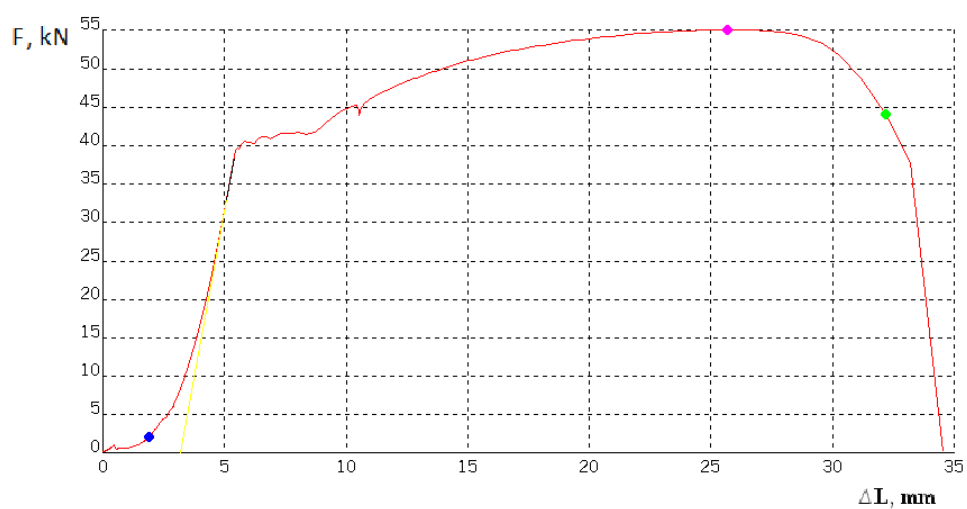
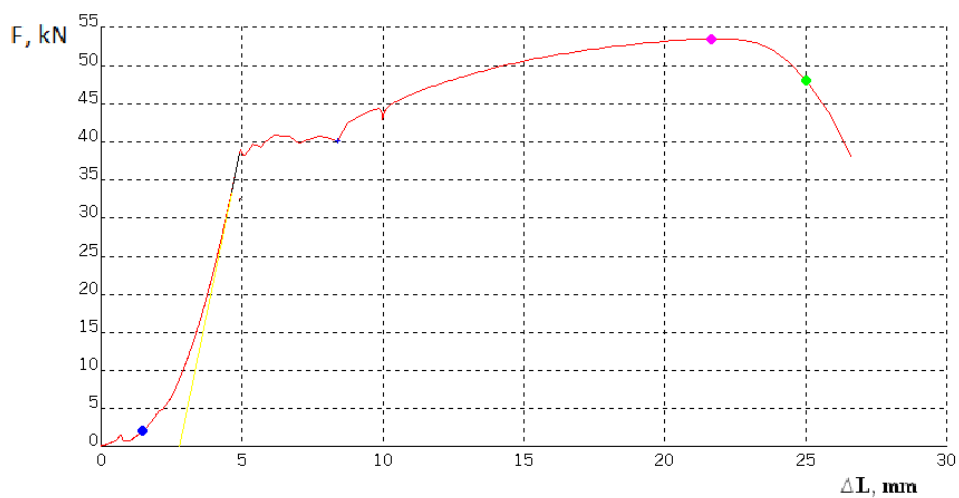
Pri ovoj brzini ispitane su tri epruvete oznaka C1, C2 i C3 čiji su dijagrami kidanja prikazani na slikama 23, 24 i 25. Rezultati ispitivanja sažeti su u tablicama 9 i 10.

Tablica 9 Rezultati deformabilnosti pri brzini ispitivanja $10 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Ispitni uzorak	d_0 (mm)	d_u (mm)	S_u (mm)	L_u (mm)	ΔL_u (mm)	ε_u (mm/mm)	A (%)	$A_{11,3}$ (%)	Z (%)
C1	12,0	6,75	35,77	75,8/143,3	15,8/23,3	0,263/0,194	26,3	19,4	68,4
C2	12,0	6,85	36,83	78,3/146,4	18,3/24,6	0,305/0,220	30,5	22,0	67,4
C3	12,0	6,90	37,39	72,6/139,5	12,6/19,5	0,210/0,163	21,0	16,3	66,8
Srednja vrijednost	12,0	6,83	36,62	75,6/143,1	15,6/22,5	0,259/0,192	25,9	19,2	67,5

Tablica 10 Rezultati mehaničke otpornosti pri brzini ispitivanja $10 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Ispitni uzorak	F_{eL} (kN)	F_{eH} (kN)	F_m (kN)	F_k (kN)	R_{eL} (N/mm ²)	R_{eH} (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	R_k (N/mm ²)
C1	41,46	42,62	55,94	49,75	367	377	495	440
C2	40,21	40,52	54,99	44,10	356	358	486	390
C3	38,36	41,08	53,46	47,90	339	363	475	424
Srednja vrijednost	40,01	41,41	54,80	47,25	354	366	485	418

**Slika 23** Dijagram sila – produljenje za epruvetu C1**Slika 24** Dijagram sila – produljenje za epruvetu C2**Slika 25** Dijagram sila – produljenje za epruvetu C3

5.1.4 Ispitivanje pri brzini prirasta opterećenja $20 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

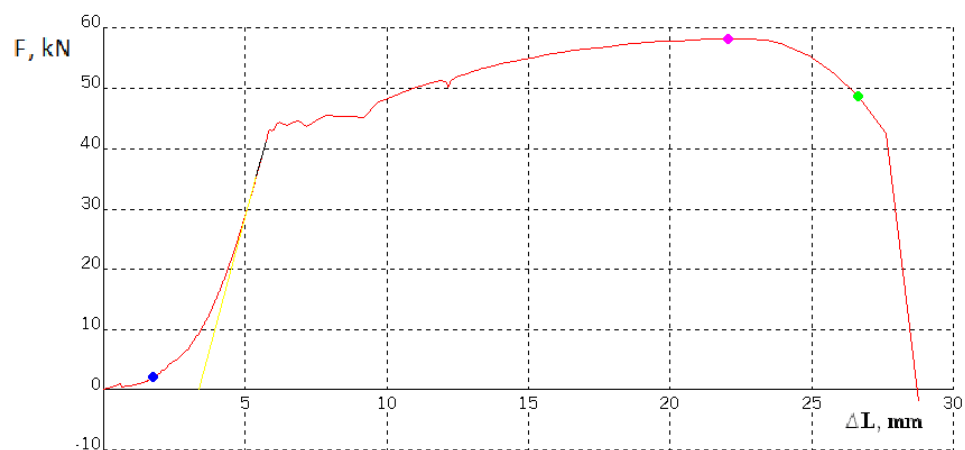
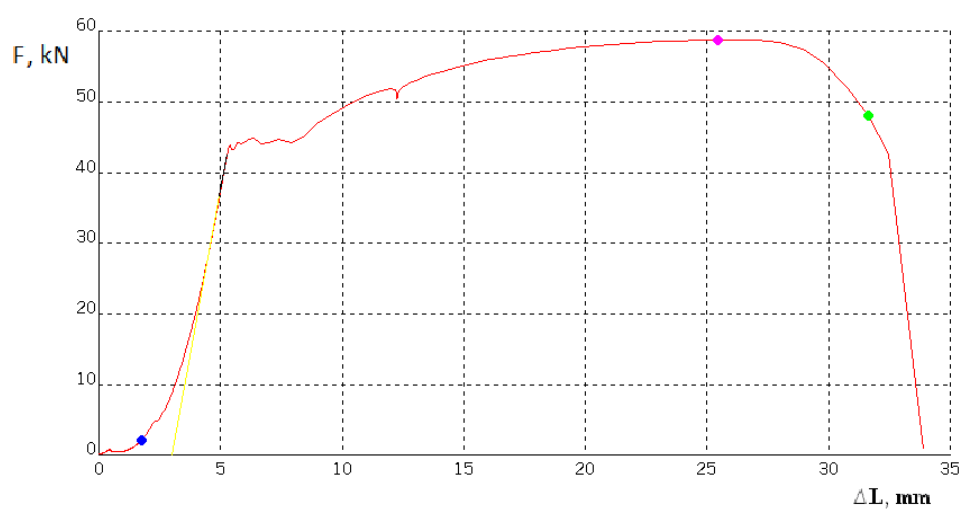
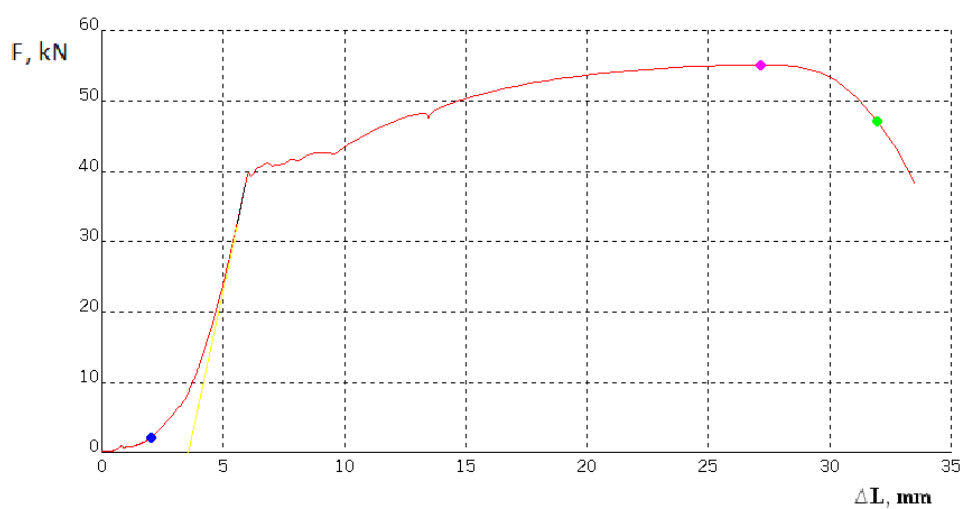
Pri ovoj brzini ispitane su tri epruvete oznaka D1, D2 i D3 čiji su dijagrami kidanja prikazani na slikama 26, 27 i 28. Rezultati ispitivanja sažeti su u tablicama 11 i 12.

Tablica 11 Rezultati deformabilnosti pri brzini ispitivanja $20 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Ispitni uzorak	d_0 (mm)	d_u (mm)	S_u (mm)	L_u (mm)	ΔL_u (mm)	ε_u (mm/mm)	A (%)	$A_{11,3}$ (%)	Z (%)
D1	12,0	6,8	36,30	74,5/140,4	14,5/20,4	0,242/0,170	24,2	17,0	67,9
D2	12,0	6,9	37,37	76,7/144,5	16,7/24,5	0,278/0,204	27,8	20,4	67,0
D3	12,0	6,7	35,26	76,2/145,1	16,2/25,1	0,270/0,209	27,0	20,9	68,7
Srednja vrijednost	12,0	6,8	36,31	75,8/143,3	15,8/23,3	0,263/0,194	26,3	19,4	67,9

Tablica 12 Rezultati mehaničke otpornosti pri brzini ispitivanja $20 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Ispitni uzorak	F_{eL} (kN)	F_{eH} (kN)	F_m (kN)	F_k (kN)	R_{eL} (N/mm ²)	R_{eH} (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	R_k (N/mm ²)
D1	43,62	44,60	58,15	48,55	386	394	514	429
D2	44,07	44,90	58,73	47,99	390	397	519	424
D3	38,71	42,72	55,10	47,15	342	378	489	417
Srednja vrijednost	42,13	44,07	57,33	47,90	373	390	507	423

**Slika 26** Dijagram sila – produljenje za epruvetu D1**Slika 27** Dijagram sila – produljenje za epruvetu D2**Slika 28** Dijagram sila – produljenje za epruvetu D3

5.1.5 Ispitivanje pri brzini prirasta opterećenja $30 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

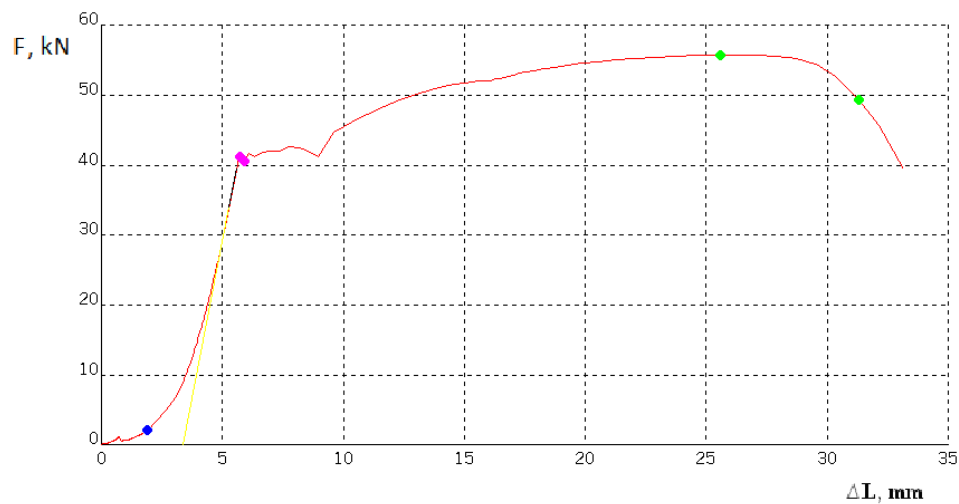
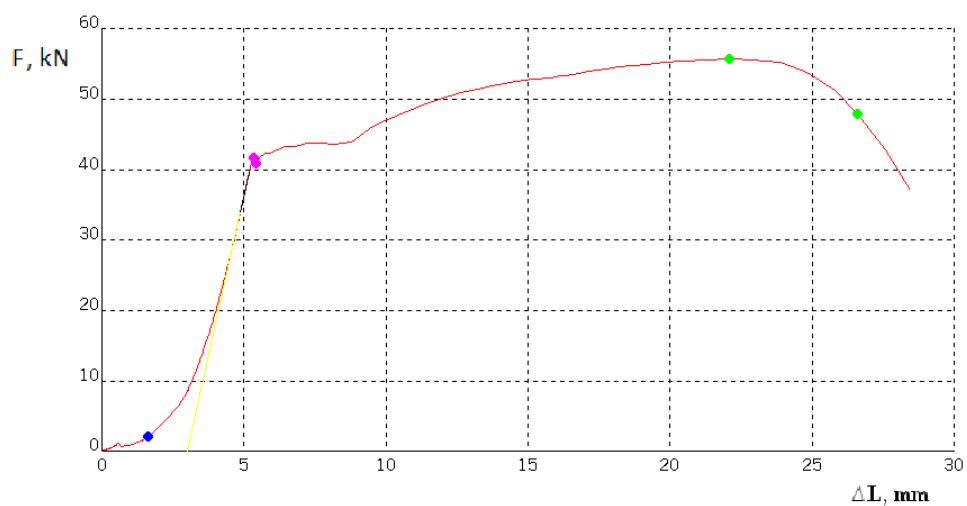
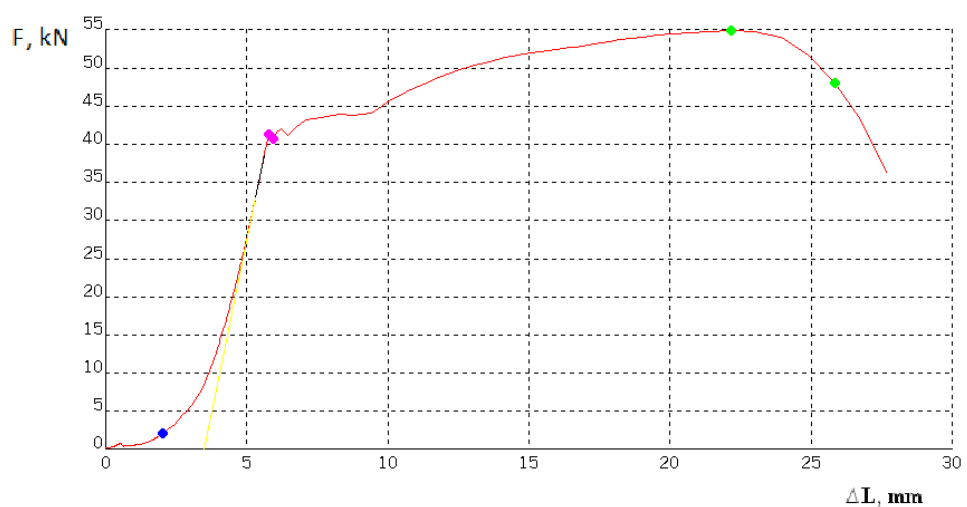
Pri ovoj brzini ispitane su tri epruvete oznaka E1, E2 i E3 čiji su dijagrami kidanja prikazani na slikama 29, 30 i 31. Rezultati ispitivanja sažeti su u tablicama 13 i 14.

Tablica 13 Rezultati deformabilnosti pri brzini ispitivanja $30 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Ispitni uzorak	d_0 (mm)	d_u (mm)	S_u (mm)	L_u (mm)	ΔL_u (mm)	ε_u (mm/mm)	A (%)	$A_{11,3}$ (%)	Z (%)
E1	12,0	6,7	35,24	75,8/144,6	15,8/24,6	0,263/0,205	26,3	20,5	68,8
E2	12,0	6,8	36,30	75,3/141,7	15,3/21,7	0,255/0,181	25,5	18,1	67,9
E3	12,0	6,9	37,37	74,4/139,7	14,4/19,7	0,240/0,164	24,0	16,4	67,0
Srednja vrijednost	12,0	6,8	36,30	75,2/142,0	15,2/22,0	0,253/0,183	25,3	18,3	67,9

Tablica 14 Rezultati mehaničke otpornosti pri brzini ispitivanja $30 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Ispitni uzorak	F_{eL} (kN)	F_{eH} (kN)	F_m (kN)	F_k (kN)	R_{eL} (N/mm ²)	R_{eH} (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	R_k (N/mm ²)
E1	40,52	41,22	55,68	49,38	358	364	492	437
E2	40,89	41,62	55,63	47,95	362	368	492	424
E3	40,61	41,21	54,81	47,91	359	364	485	424
Srednja vrijednost	40,67	41,35	55,37	48,41	360	365	490	428

**Slika 29** Dijagram sila – produljenje za epruvetu E1**Slika 30** Dijagram sila – produljenje za epruvetu E2**Slika 31** Dijagram sila – produljenje za epruvetu E3

5.1.6 Ispitivanje pri brzini prirasta opterećenja $50 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

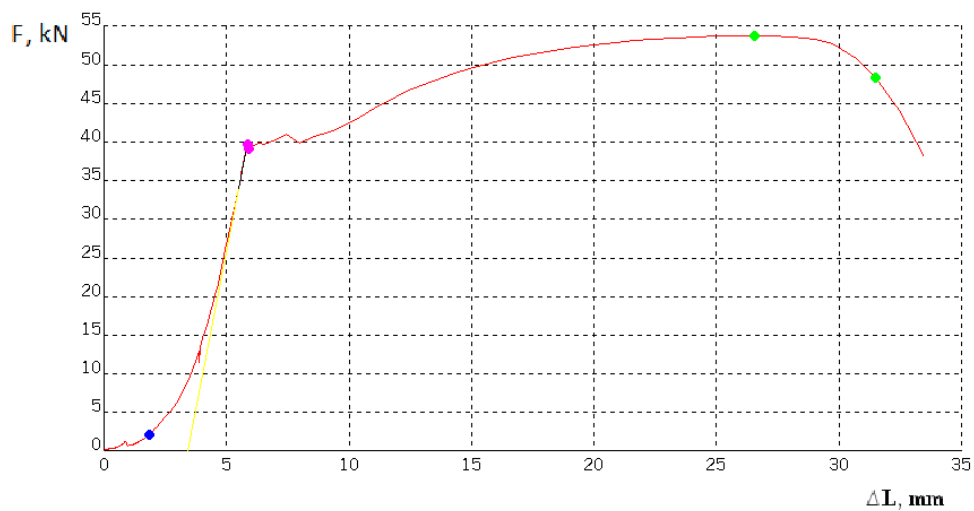
Pri ovoj brzini ispitane su tri epruvete oznaka F1, F2 i F3 čiji su dijagrami kidanja prikazani na slikama 32, 33 i 34. Rezultati ispitivanja sažeti su u tablicama 15 i 16.

Tablica 15 Rezultati deformabilnosti pri brzini ispitivanja $50 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

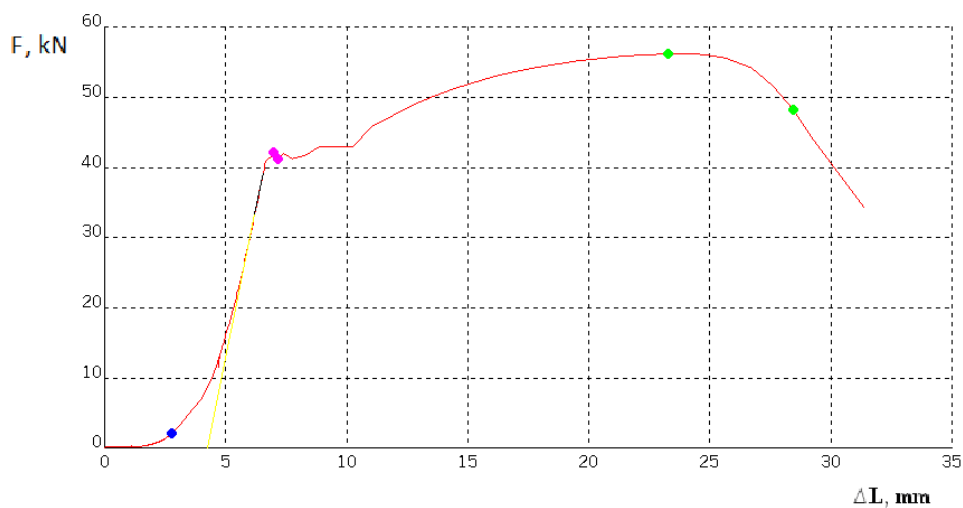
Ispitni uzorak	d_0 (mm)	d_u (mm)	S_u (mm)	L_u (mm)	ΔL_u (mm)	ε_u (mm/mm)	A (%)	$A_{11,3}$ (%)	Z (%)
F1	12,0	6,6	33,99	77,1/145,5	17,1/25,5	0,285/0,213	28,5	21,3	70,0
F2	12,0	7,0	38,47	75,8/140,9	15,8/20,9	0,263/0,174	26,3	17,4	66,0
F3	12,0	6,7	35,24	76,2/144,2	16,2/24,2	0,270/0,202	27,0	20,2	68,8
Srednja vrijednost	12,0	6,8	35,90	76,4/143,5	16,4/23,5	0,273/0,196	27,3	19,6	68,3

Tablica 16 Rezultati mehaničke otpornosti pri brzini ispitivanja $50 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

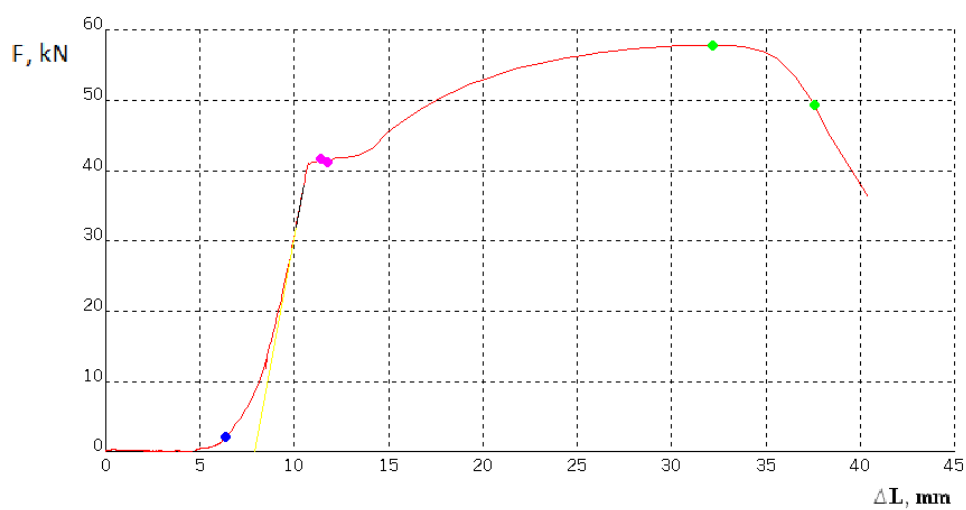
Ispitni uzorak	F_{eL} (kN)	F_{eH} (kN)	F_m (kN)	F_k (kN)	R_{eL} (N/mm ²)	R_{eH} (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	R_k (N/mm ²)
F1	39,00	39,67	53,68	48,26	345	351	475	427
F2	41,18	42,20	56,10	48,23	364	373	496	426
F3	41,17	41,59	57,84	49,34	364	368	511	436
Srednja vrijednost	40,45	41,15	55,87	48,61	358	364	494	430



Slika 32 Dijagram sila – produljenje za epruvetu F1



Slika 33 Dijagram sila – produljenje za epruvetu F2



Slika 34 Dijagram sila – produljenje za epruvetu F3

5.1.7 Ispitivanje pri brzini prirasta opterećenja $100 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

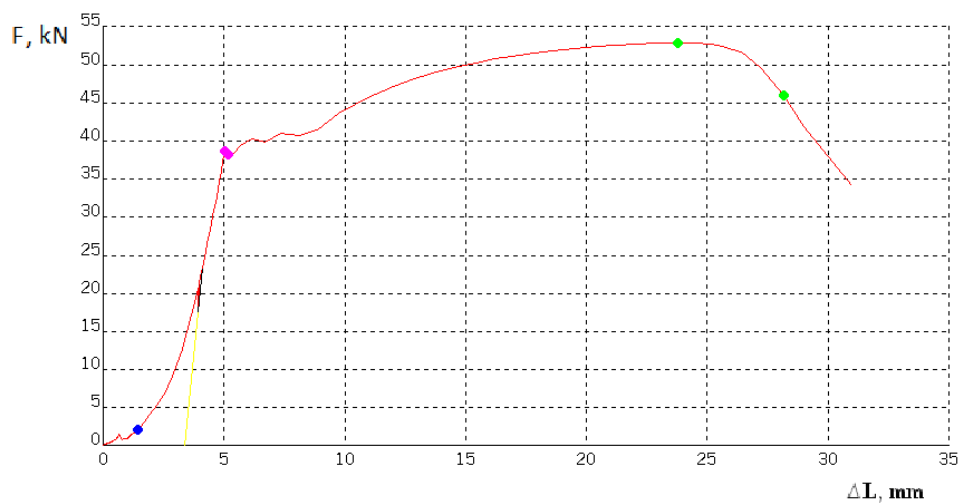
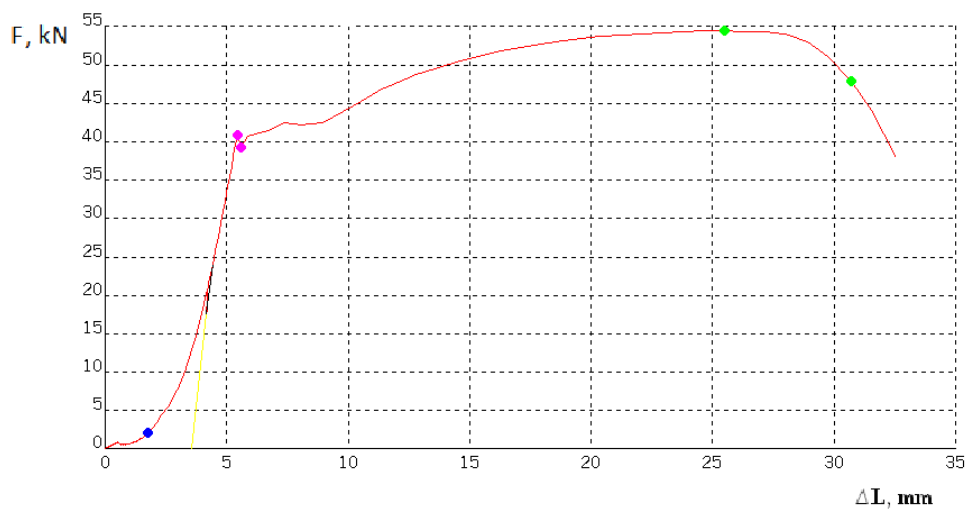
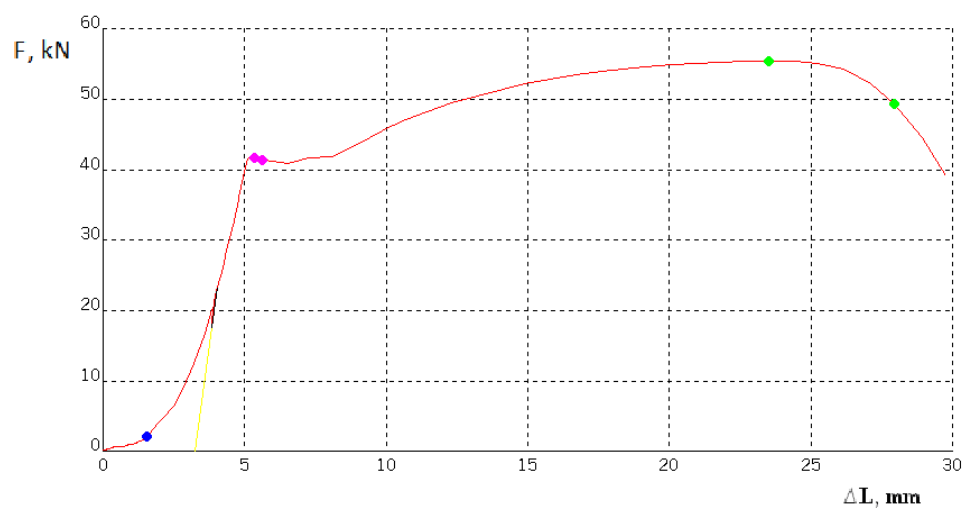
Pri ovoj brzini ispitane su tri epruvete oznaka G1, G2 i G3 čiji su dijagrami kidanja prikazani na slikama 35, 36 i 37. Rezultati ispitivanja sažeti su u tablicama 17 i 18.

Tablica 17 Rezultati deformabilnosti pri brzini ispitivanja $100 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Ispitni uzorak	d_0 (mm)	d_u (mm)	S_u (mm)	L_u (mm)	ΔL_u (mm)	ε_u (mm/mm)	A (%)	$A_{11,3}$ (%)	Z (%)
G1	12,0	6,8	36,30	74,7/143,1	14,7/23,1	0,245/0,193	24,5	19,3	67,9
G2	12,0	6,6	34,20	76,5/144,7	16,5/24,7	0,275/0,206	27,5	20,6	69,8
G3	12,0	6,7	35,24	75,6/142,5	15,6/22,5	0,260/0,188	26,0	18,8	68,8
Srednja vrijednost	12,0	6,7	35,25	75,6/143,4	15,6/23,4	0,260/0,195	26,0	19,6	68,8

Tablica 18 Rezultati mehaničke otpornosti pri brzini ispitivanja $100 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

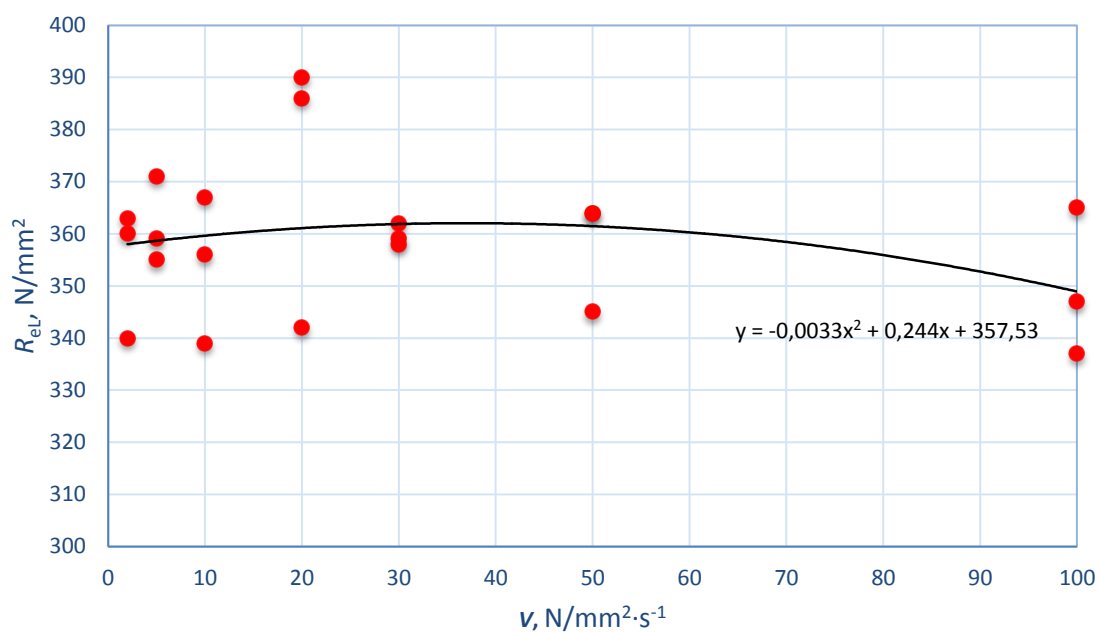
Ispitni uzorak	F_{eL} (kN)	F_{eH} (kN)	F_m (kN)	F_k (kN)	R_{eL} (N/mm^2)	R_{eH} (N/mm^2)	R_m (N/mm^2)	R_k (N/mm^2)
G1	38,13	38,66	52,81	45,97	337	342	467	406
G2	39,23	40,80	54,37	47,81	347	361	481	423
G3	41,33	41,68	55,40	49,30	365	368	490	436
Srednja vrijednost	39,56	40,38	54,19	47,69	350	357	479	422

**Slika 35** Dijagram sila – produljenje za epruvetu G1**Slika 36** Dijagram sila – produljenje za epruvetu G2**Slika 37** Dijagram sila – produljenje za epruvetu G3

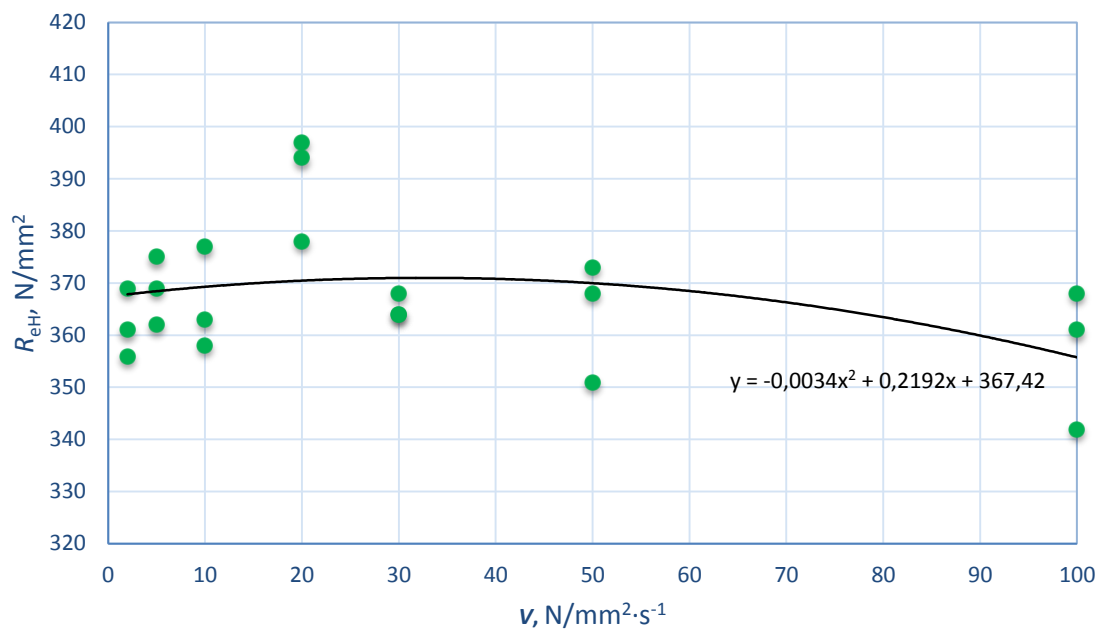
6 ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

Međusobnom usporedbom mehaničkih svojstava utvrđenih pri različitim brzinama ispitivanja određena je zakonitost promjene specifičnih mehaničkih značajki. Usporedba se odnosi na sljedeća mehanička svojstva: gornju granicu razvlačenja (R_{eH}), donju granicu razvlačenja (R_{eL}), vlačnu čvrstoću (R_m), konačno naprezanje (R_k) i istežljivost za kratku i dugu epruvetu (A , $A_{11,3}$).

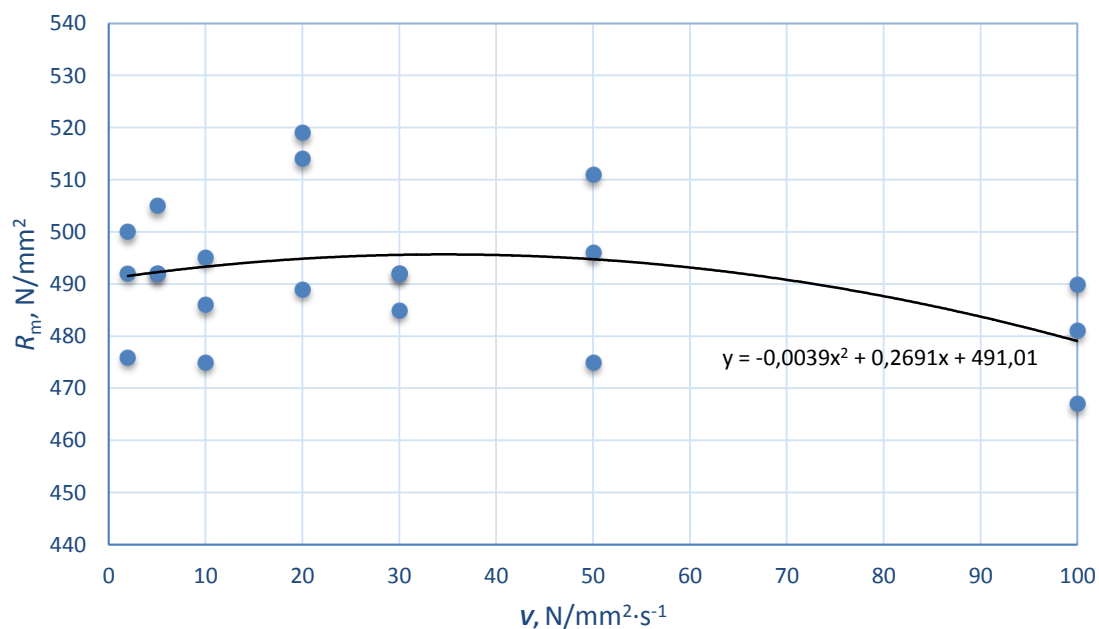
Na slikama od 38 do 41 prikazani su dijagrami promjene donje granice razvlačenja (R_{eL}), gornje granice razvlačenja (R_{eH}), vlačne čvrstoće (R_m), i konačnog naprezanja (R_k) u ovisnosti o brzini prirasta opterećenja.



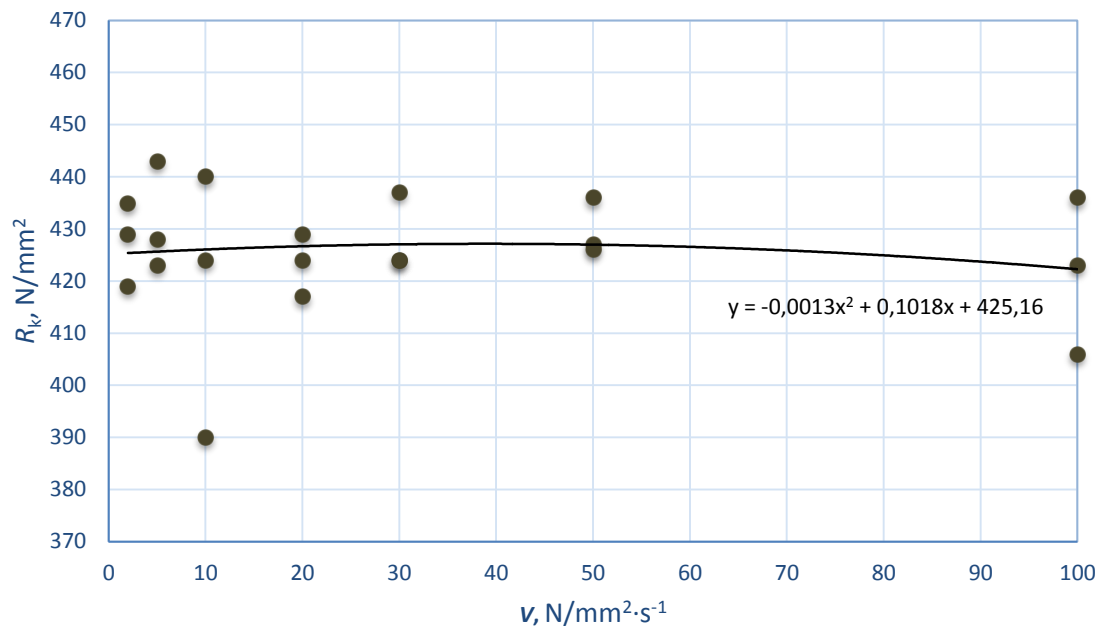
Slika 38 Prikaz promjene donje granice razvlačenja u ovisnosti o brzini prirasta opterećenja



Slika 39 Prikaz promjene gornje granice razvlačenja u ovisnosti o brzini prirasta opterećenja

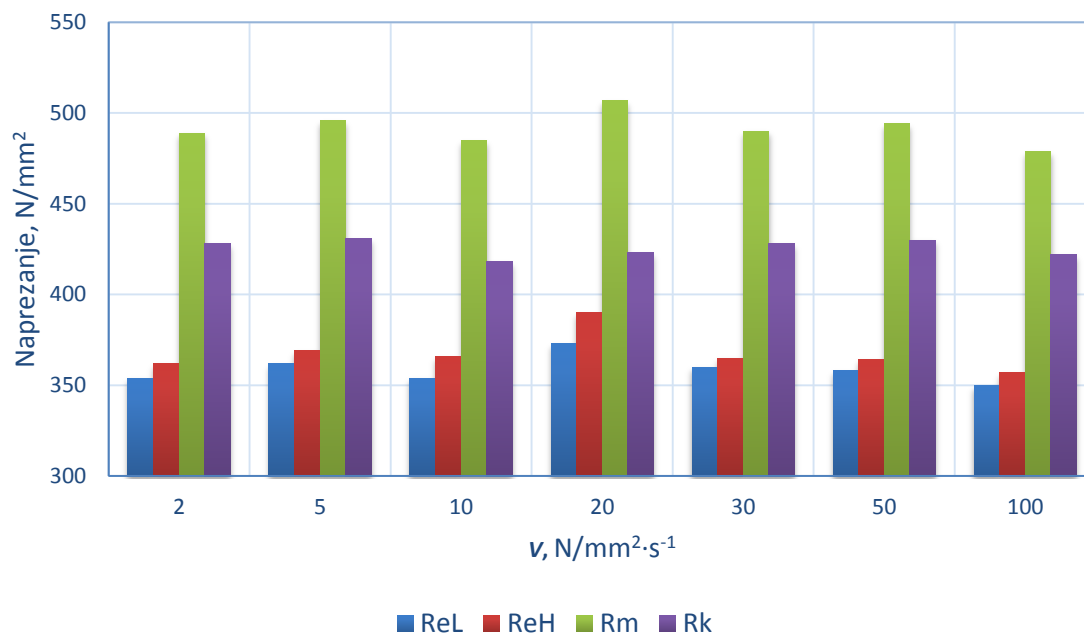


Slika 40 Prikaz promjene vlačne čvrstoće u ovisnosti o brzini prirasta opterećenja



Slika 41 Prikaz promjene konačnog naprezanja u ovisnosti o brzini prirasta opterećenja

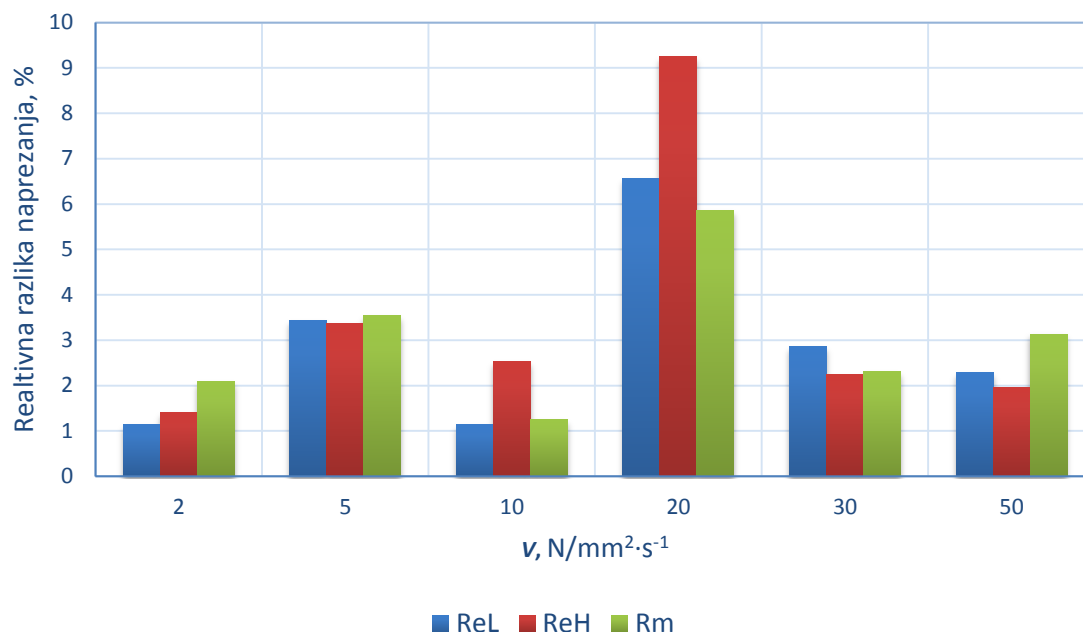
Na slici 42 prikazane su vrijednosti sva četiri karakteristična naprezanja pri različitim brzinama ispitivanja. Prikazi na dijagramima 42 do 44 dobiveni su na osnovi srednje vrijednosti triju mjerenja kod svake ispitne brzine.



Slika 42 Vrijednosti naprezanja pri različitim brzinama prirasta opterećenja

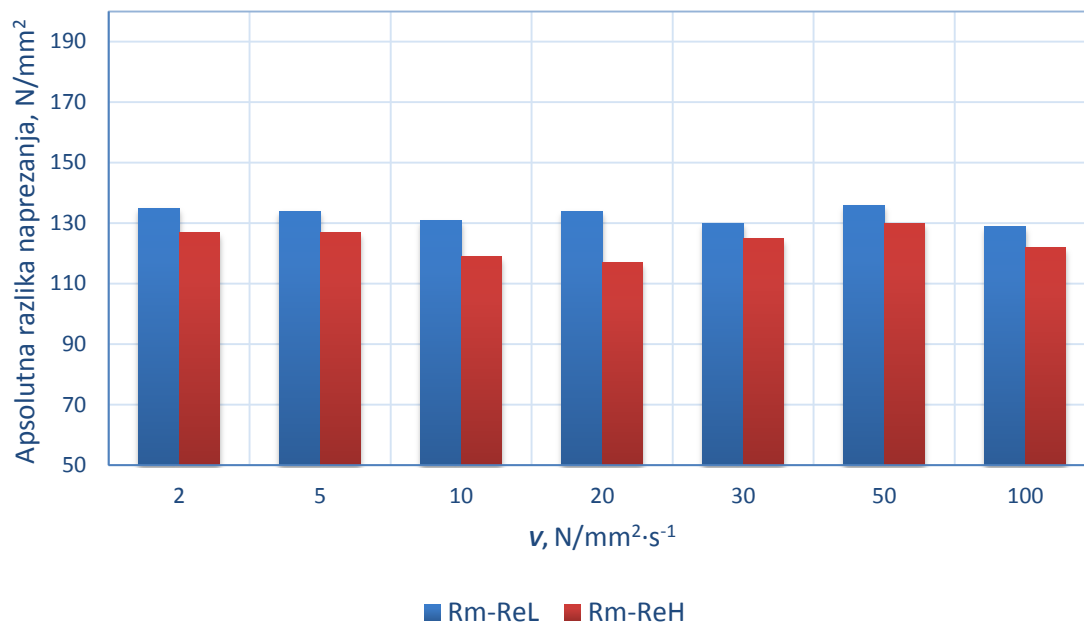
Najveće vrijednosti donje i gornje granice razvlačenja te vlačne čvrstoće zabilježene su pri brzini

prirasta opterećenja od $20 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, dok su najniže vrijednosti određene pri najvećoj ispitnoj brzini od $100 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Relativna razlika ovih naprezanja u odnosu na najniže vrijednosti zabilježene pri $100 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ prikazana je slikom 43.



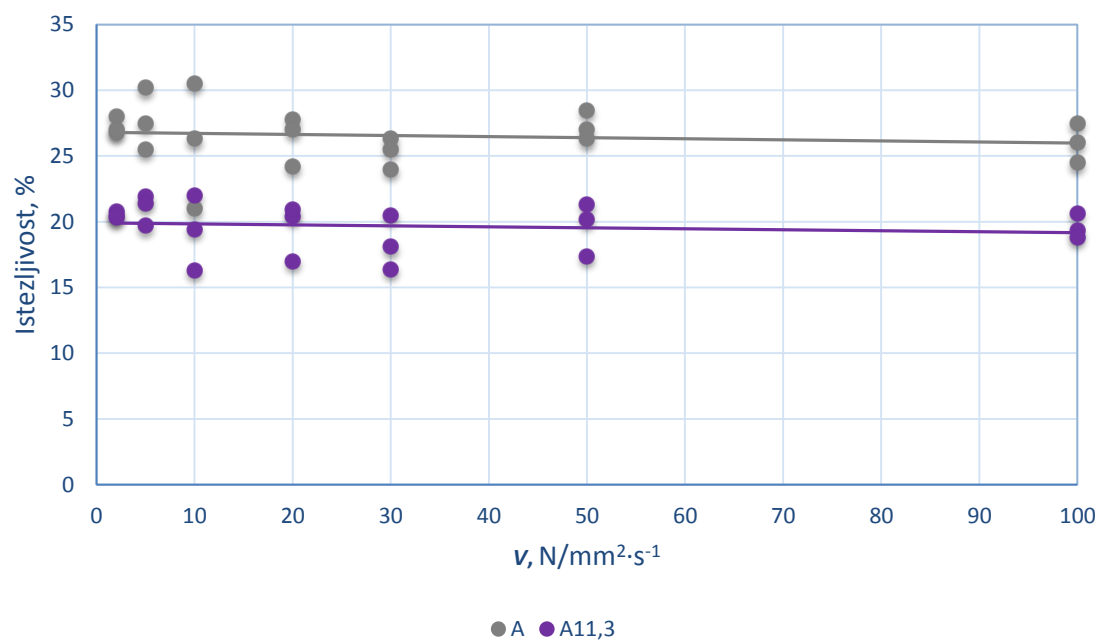
Slika 43 Postotna razlika naprezanja pri različitim brzinama prirasta opterećenja

Na slici 44 predložena je apsolutna razlika između vlačne čvrstoće te donje odnosno gornje granice razvlačenja za različite brzine opterećivanja. Evidentno je da su ove razlike pri svim ispitnim brzinama približno konstantne tako da se variranje mehaničke otpornosti može pripisati promjeni granice razvlačenja.



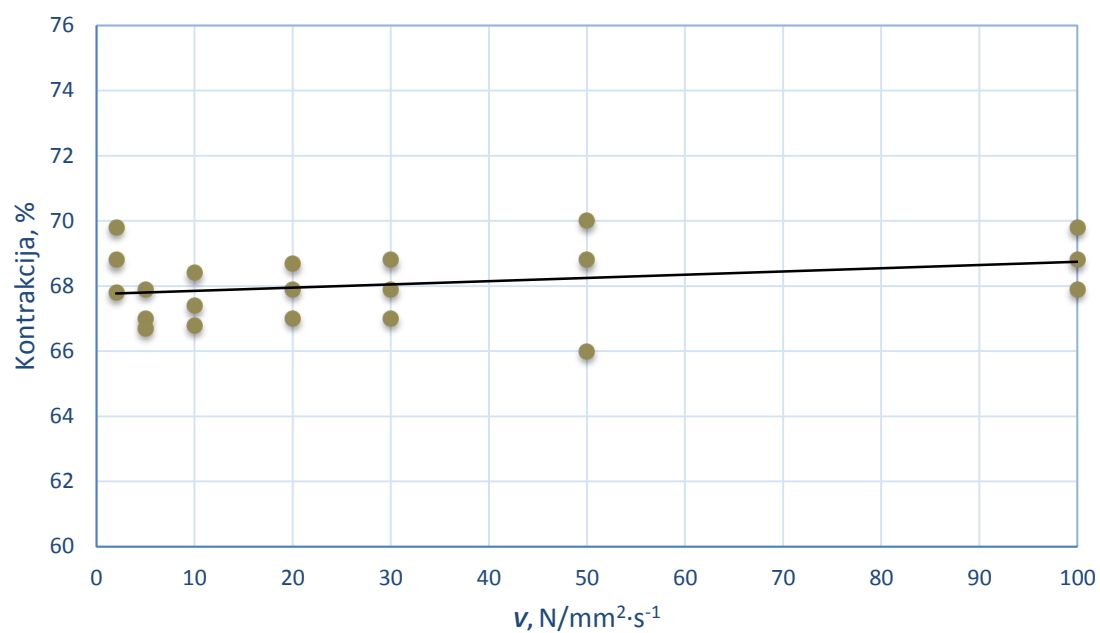
Slika 44 Razlike naprezanja pri različitim brzinama prirasta opterećenja

Na slici 45 prikazane su istezljivosti za proporcionalno kratku odnosno dugu epruvetu ispitanu pri različitim brzinama u području 2 do 100 $\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.



Slika 45 Prikaz promjene istezljivosti u ovisnosti o brzini prirasta opterećenja

Slika 46 odnosi se na vrijednosti kontrakcije određene pri različitim brzinama razvlačenja epruvete.



Slika 46 Prikaz promjene kontrakcije u ovisnosti o brzini prirasta opterećenja

ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata može se zaključiti da brzina prirasta opterećenja tijekom statičkog vlačnog ispitivanja ima stanovit utjecaj na vrijednosti mehaničkih svojstava kao što su granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, istezljivost i kontrakcija, ali za ispitivane epruvete od mekog čelika nije moguće egzaktno odrediti zakonitost promjene karakterističnih naprezanja i veličina deformabilnosti uslijed velikog rasipanja rezultata pri određenoj ispitnoj brzini. Glavni problem ovog rada bilo je pucanje epruveta izvan srednje trećine mjernog područja što se odrazilo i na ispitivane mehaničke značajke. Za svako daljnje istraživanje koje bi se s većom točnošću odredilo zakonitost promjene analiziranih svojstava potrebno je ispitati veći broj epruveta kod svake brzine prirasta opterećenja.

Ono što je moguće zaključiti je činjenica da su najviše vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće zabilježene pri brzini prirasta opterećenja $20 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, dok su najniže vrijednosti određene pri najvećoj ispitnoj brzini od $100 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Variranje mehaničke otpornosti uglavnom se može pripisati promjeni granice razvlačenja.

LITERATURA

- [1] International standard ISO 6892-1: Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature, 2009.
- [2] Franz, M.: Mehanička svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998.
- [3] Ćorić, D.; Alar, Ž.: Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala, predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [4] Filetin, T.; Kovačiček, F.; Indof, J.: Svojstva i primjena materijala / Filetin, Tomislav (ur.) Zagreb : Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [5] <http://brod.sfsb.hr/~ikladar/Materijali%20I/Vlacni%20pokus.pdf>
- [6] <http://hr.wikipedia.org/wiki/Kidalica>
- [7] http://www.fsb.hr/zavod_za_materijale/html/
- [8] Ivanec, T.: Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2012.
- [9] Renjo, R.: Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2010.